

■ POUR LA

SCIENCE

Septembre 2016 - n° 467

www.pourlascience.fr

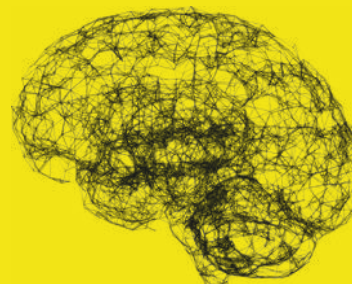
Édition française de Scientific American

Les MATHS de Grothendieck

L'héritage fertile d'un génie

NEUROBIOLOGIE

ALZHEIMER, PARKINSON
Quand le cerveau n'évacue plus ses déchets



OBSERVATOIRE DE PARIS

DIPLÔME D'UNIVERSITÉ

EN PRÉSENTIEL ET À DISTANCE

“EXPLORER ET COMPRENDRE L'UNIVERS”

Objectifs

L'Observatoire de Paris propose la préparation d'un diplôme d'Université permettant d'acquérir un panorama des connaissances actuelles et des recherches en cours en astronomie et en astrophysique auprès d'astronomes professionnels.

Publics concernés

Ces cours s'adressent à toutes les personnes passionnées d'astronomie et de niveau baccalauréat scientifique ou équivalent.

Les étudiants inscrits à l'université dans le cadre du LMD peuvent valider en ECTS sous réserve d'accord avec leur responsable pédagogique. Possibilité d'inscription dans le cadre de la formation permanente.



Contenu

Cette formation, de niveau L1-L2, peut être suivie en présentiel et à distance sous forme de cours le mardi soir de 17h à 20h à l'Observatoire de Paris ou de cours filmés en différé.

Un stage pratique de traitement de données a lieu en mars à l'Observatoire de Meudon (en option et sous conditions ; nombre de places limité).

Un stage facultatif de 4 nuits d'observation a lieu l'été à l'Observatoire de Haute-Provence (en option et sous conditions ; nombre de places limité).

Les sujets abordés sont les suivants :

- ▶ Mécanique céleste et astrométrie
- ▶ Histoire de l'astronomie
- ▶ Ondes et instruments
- ▶ Le soleil
- ▶ Planétologie comparée
- ▶ Traitement de données
- ▶ Etoiles et milieu interstellaire
- ▶ Galaxies
- ▶ Cosmologie
- ▶ Observations

Inscriptions

Dossiers à déposer avant le 7 septembre sur le site d'inscription en ligne : https://ufe.obspm.fr/candidatures_ufe

Renseignements

<http://duop.obspm.fr/-DU-Explorer-et-Comprendre-l-Univers->

contact.duecu@obspm.fr

Téléphone : 01.45.07.78.87



Groupe POUR LA SCIENCE

Directrice des rédactions : Cécile Lestienne

Pour la Science

Rédacteur en chef : Maurice Mashaal

Rédactrice en chef adjointe : Marie-Neige Cordonnier

Rédacteurs : François Savatier, Philippe Ribeau-Gésippe, Guillaume Jacquemont, Sean Bailly

Dossier Pour la Science

Rédacteur en chef adjoint : Loïc Mangin

Développement numérique : Philippe Ribeau-Gésippe, assisté d'Alice Mastracci et William Rowe-Pirra

Directrice artistique : Céline Lapert

Maquette : Pauline Bilbault, Raphaël Queruel, Ingrid Leroy, assistés de Cassandra Vion

Correction et assistance administrative : Anne-Rozenn Jouble

Marketing & diffusion : Laurence Hay et Ophélie Maillet

Direction financière et direction du personnel : Marc Laumet

Fabrication : Marianne Sigogne et Olivier Lacam

Directrice de la publication et Gérante : Sylvie Marcé

Anciens directeurs de la rédaction :

Françoise Pétry et Philippe Boulanger

Conseiller scientifique : Hervé This

Ont également participé à ce numéro : Lydia Ben Ytzhak, Isabelle Bousquet-Maniguet, Maud Bruguière, Hélène Gélot, Évelyne Host-Platret, Patrick Jagoret, François Lè, Sylvain Nascimbène, Christophe Pichon, Bernard Schmitt, Marc-André Selosse, Daniel Tacquenet, Mylène Weill

PRESSE ET COMMUNICATION

Susan Mackie

susan.mackie@pourlascience.fr - 01 55 42 85 05

PUBLICITÉ France

Directeur de la Publicité : Jean-François Guillotin

(jf.guillotin@pourlascience.fr)

Tél. : 01 55 42 84 28 • Fax : 01 43 25 18 29

ABONNEMENTS

Abonnement en ligne : <http://boutique.pourlascience.fr>

Courriel : pourlascience@abopress.fr

Téléphone : 03 67 07 98 17

Adresse postale : Service des abonnements - Pour la Science, 19 rue de l'Industrie, BP 90053, 67402 Illkirch Cedex

Tarifs d'abonnement 1 an - 12 numéros

France métropolitaine : 59 euros - Europe : 71 euros

Reste du monde : 85,25 euros

COMMANDES DE LIVRES OU DE MAGAZINES

Pour la Science,

628 avenue du Grain d'Or, 41350 Vineuil

pourlasciencevpc@audin.fr • Tél. : 02 18 54 12 64

DIFFUSION

Contact kiosques : À Juste Titres ; Benjamin Boutonnet

Tél. : 04 88 15 12 41

Information/modification de service/réassort :

www.direct-editeurs.fr

SCIENTIFIC AMERICAN Editor in chief : Mariette DiChristina.

Executive editor : Fred Guterl. Design director : Michael Mrak.

Managing editor : Ricky Rusting. Senior editors : Mark Fischetti,

Seth Fletcher, Christine Gorman, Michael Moyer, Clara

Moskowitz, Gary Stix, Kate Wong. President : Dean Sanderson.

Executive Vice President : Michael Florek.

Toutes demandes d'autorisation de reproduire, pour le public français ou francophone, les textes, les photos, les dessins ou les documents contenus dans la revue « Pour la Science », dans la revue « Scientific American », dans les livres édités par « Pour la Science » doivent être adressées par écrit à « Pour la Science S.A.R.L. », 8 rue Férou, 75278 Paris Cedex 06.

© Pour la Science S.A.R.L. Tous droits de reproduction, de traduction, d'adaptation et de représentation réservés pour tous les pays. La marque et le nom commercial « Scientific American » sont la propriété de Scientific American, Inc. Licence accordée à « Pour la Science S.A.R.L. ». En application de la loi du 11 mars 1957, il est interdit de reproduire intégralement ou partiellement la présente revue sans autorisation de l'éditeur ou du Centre français de l'exploitation du droit de copie [20 rue des Grands-Augustins - 75006 Paris].



Maurice Mashaal
rédacteur en chef

Le génie sans concession

Dans les années 1950 à 1970, en France, un mathématicien exceptionnellement brillant a impressionné tous ses confrères : Alexandre Grothendieck (qui tenait à ce qu'on l'appelle Alexander, mais l'usage en a décidé autrement). Déjà une légende de son vivant, ce personnage laisse, après son décès, en novembre 2014, à l'âge de 86 ans, un héritage considérable. Mathématique d'abord, par ses travaux qui ont révolutionné la géométrie algébrique – l'étude d'objets géométriques définis par des équations algébriques – et qui continuent de nourrir la recherche mathématique moderne. Schémas, sites, topos, tels sont quelques-uns des mots-clés de l'œuvre de Grothendieck, qui recouvrent des notions d'une grande généralité, donc puissantes et abstraites (voir pages 21 à 37).

Plusieurs dizaines de milliers de pages à éplucher

Grothendieck lui-même considérait son œuvre mathématique comme un grand chantier inachevé. Depuis son retrait brutal de la scène scientifique, en 1970, et jusqu'à la dernière période de sa vie, loin des hommes, il a écrit des dizaines de milliers de pages non publiées. Recèlent-elles des idées nouvelles et fécondes ? Ce sera aux mathématiciens d'en juger – à condition que les difficultés juridiques qui empêchent aujourd'hui l'accès à ces documents soient levées.

En dehors des mathématiques, les écrits de Grothendieck regorgent de réflexions sur lui-même, son passé tragique et intime, ses anciens collègues, le milieu scientifique, la créativité, la vie, le « Mal », etc. Le tout exprimé dans un style unique, à la fois fluide, foisonnant et ésotérique, qui peut forcer l'admiration ou, au contraire, faire douter de la santé mentale de l'auteur (voir pages 38 à 41). C'est aussi cela, l'héritage de Grothendieck : le témoignage et la quête de sens d'une personnalité hors du commun et sans concession, dont le génie mathématique s'est trop tôt isolé. ■

3 Édito

Actualités

- 6 Sclérose en plaques : un traitement en vue
- 7 Au moins deux origines à l'agriculture
- 8 Le réchauffement climatique change la couverture nuageuse
- 11 Première simulation quantique en physique des particules



- 12 Le puzzle des plaques tectoniques enfin compris

Retrouvez plus d'actualités sur www.pourlascience.fr

Réflexions & débats

- 14 **Point de vue**
Il est important de savoir comment l'ignorance est produite
Mathias Girel
- 16 **Homo sapiens informaticus**
Informatique à l'école : en progrès, doit persévérer
Gilles Dowek



- 18 **Cabinet de curiosités sociologiques**
À petites structures, meilleurs résultats scolaires ? Méfiance !
Gérald Bronner

Ce numéro comporte un encart d'abonnement broché + un encart d'abonnement jeté en cahier intérieur sur la diffusion kiosque en France ainsi qu'un catalogue abonnements *Rue des étudiants* sur une sélection d'abonnés France DOM TOM.
En couverture : © Pour la Science

DOSSIER p. 21

Les MATHS de Grothendieck

22 Un génie des maths devenu ermite

Winfried Scharlau

Une jeunesse marquée par la guerre, la gloire scientifique, une fin de vie en solitaire et empreinte de mysticisme : tel était le destin fort singulier d'Alexandre Grothendieck, l'un des plus brillants mathématiciens du XX^e siècle.

30 Un héritage mathématique fertile

Jean Malgoire

Parmi les multiples concepts qu'Alexandre Grothendieck a inventés, celui de topos est sans aucun doute le plus puissant. Il est devenu un outil de base des mathématiciens.

38 Un écrivain en quête de vérité

Leila Schneps

Alexandre Grothendieck a laissé bien plus qu'une œuvre mathématique monumentale : une façon d'aborder le monde sans fard ni artifices, à commencer par ceux dont on se pare soi-même pour affronter la vie.

42 GÉNÉTIQUE Aux origines génétiques de l'obésité

Richard Johnson et Peter Andrews

Selon une hypothèse émise en 1962, un gène favorisant le stockage des graisses a aidé nos lointains ancêtres à traverser les périodes de disette et expliquerait la pandémie actuelle d'obésité et de diabète. Les chercheurs pensent avoir identifié ce « gène d'épargne ».

50 **COSMOLOGIE** **Le projet DES à la poursuite de l'énergie sombre**

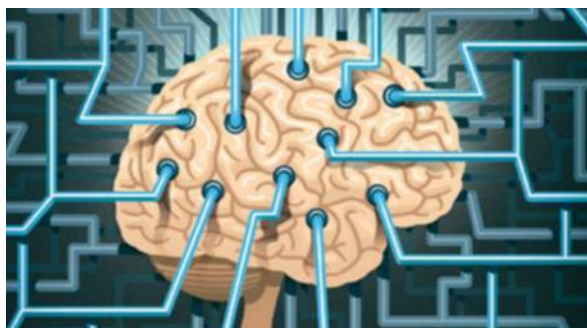
Joshua Frieman

Pourquoi l'expansion de l'Univers est-elle de plus en plus rapide ? Pour résoudre cette grande énigme de la cosmologie, les scientifiques plongent leur regard dans les confins du cosmos grâce à l'expérience *Dark Energy Survey*.

58 **NEUROBIOLOGIE** **Comment le cerveau évacue ses déchets**

Maiken Nedergaard et Steven Goldman

Comme tous les organes en activité, le cerveau produit des déchets et toxines dont il doit se débarrasser. Pour la première fois, des observations ont révélé comment ce nettoyage s'effectue.



64 **AGRONOMIE** **Soigner les terres agricoles d'Afrique**

John Reganold et Jerry Glover

Par des méthodes d'agroforesterie, en faisant pousser des arbres, des arbustes et d'autres plantes pérennes au sein de leurs cultures céréalières, des agriculteurs africains revitalisent leurs sols appauvris tout en augmentant les rendements.

70 **MICROBIOLOGIE** **Une bactérie pour lutter contre la dengue**

Scott O'Neill

Si l'on infecte des moustiques vecteurs de la dengue avec certaines bactéries, on bloque la réplication du virus en leur sein. En libérant ensuite ces insectes dans la nature, les chercheurs espèrent limiter fortement la propagation de la maladie.

Rendez-vous

78 **Logique & calcul**

Les arbres des mathématiciens sont-ils tous gracieux ?

Jean-Paul Delahaye

Un problème de graphes dont l'énoncé, simple, a été donné il y a cinquante ans résiste toujours.

84 **Science & fiction**

L'imaginaire à la carte

J. Sébastien Steyer et Roland Lehoucq

86 **Art & science**

Des fleurs incandescentes dans le ciel

Loïc Mangin



89 **Idées de physique**

Des fluides sens dessus dessous

Jean-Michel Courty et Édouard Kierlik

92 **Question aux experts**

La France détient-elle une partie de l'Antarctique ?

Pierre Jouventin

94 **Science & gastronomie**

En bouche, le vin change

Hervé This

96 **À lire**

98 **Bloc-notes**

Les chroniques de Didier Nordon

SCIENCE LETTRE D'INFORMATION



Ne manquez pas la parution de votre magazine grâce à la **NEWSLETTER**

- Notre sélection d'articles
- Des offres préférentielles
- Nos autres magazines en kiosque

Recevez gratuitement la lettre d'information en inscrivant uniquement votre adresse mail sur www.pourlascience.fr

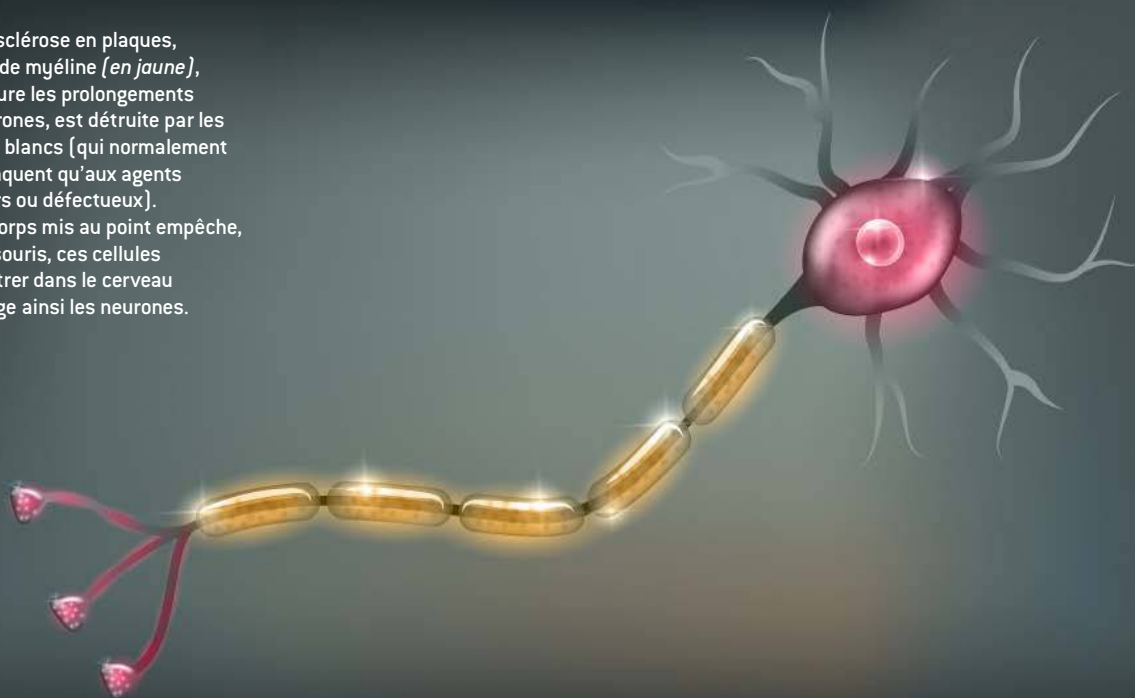
Actualités

Médecine

Sclérose en plaques : un traitement en vue

Une nouvelle cible thérapeutique de la sclérose en plaques vient d'être identifiée : la barrière hématoencéphalique qui isole le cerveau. Une molécule nommée Glunomab, qui rétablit son imperméabilité, stoppe l'évolution de la maladie chez les souris.

Dans la sclérose en plaques, la gaine de myéline (en jaune), qui entoure les prolongements des neurones, est détruite par les globules blancs (qui normalement ne s'attaquent qu'aux agents étrangers ou défectueux). Un anticorps mis au point empêche, chez la souris, ces cellules de pénétrer dans le cerveau et protège ainsi les neurones.



© Shutterstock.com/Tefi

Il y a six ans, Claire, alors âgée de 31 ans, se réveille avec une douleur à l'œil. Elle voit flou. Puis le trouble s'estompe. Mais quelques mois après, elle ressent des picotements dans les jambes et finit par consulter un médecin. Après quelques « crises » séparées de périodes d'accalmie, le diagnostic est clair : elle est atteinte de sclérose en plaques, plus précisément de la forme la plus fréquente où les symptômes apparaissent, puis disparaissent, avant de réapparaître ailleurs. Plus de 80 000 personnes sont concernées en France. C'est la première cause d'invalidité neurologique chez l'adulte jeune, la maladie se déclenchant entre 15 et 50 ans. Des traitements améliorent la vie des

patients, mais n'empêchent pas toujours l'évolution de la maladie. Le médicament qui sera peut-être développé suite aux résultats de Fabian Docagne, du centre Cyceyron à Caen, de Diego Clemente, de l'hôpital de Tolède, en Espagne, et de leurs collègues est prometteur : il bloque la progression de la maladie chez les souris.

La sclérose en plaques est une maladie auto-immune : le système de défense de l'organisme attaque des protéines dans le système nerveux central (cerveau et moelle épinière) comme s'il s'agissait de corps étrangers ou d'agents infectieux. Or ces protéines constituent la gaine de myéline qui entoure les prolongements des neurones et facilite normalement

la transmission des messages nerveux. Dans la maladie, les soldats immunitaires, les globules blancs, détruisent la myéline dans une zone du système nerveux, se retirent, puis réapparaissent des semaines, des mois, voire des années plus tard dans une autre. Les symptômes sont nombreux : engourdissements, douleurs, fourmillements, tremblements, maladresse, troubles de la vision... selon la région nerveuse ou cérébrale attaquée.

Mais pour s'en prendre à la gaine de myéline, les globules blancs doivent traverser un mur normalement quasi infranchissable séparant le sang du tissu nerveux : la « barrière hématoencéphalique », un réseau très

dense de cellules dites endothéliales, qui entoure les vaisseaux sanguins dans le système nerveux central. Sans que l'on sache pourquoi, dans la sclérose en plaques, sous l'effet de la réaction immunitaire, cette barrière devient perméable, ouvrant la voie aux globules blancs.

La plupart des médicaments actuels ciblent la réaction immunitaire en dehors du système nerveux. Mais les effets secondaires, notamment une diminution de la capacité à se défendre contre les virus, obligent souvent à l'arrêt des traitements.

Fabian Docagne et ses collègues se sont alors intéressés à la barrière hématoencéphalique. Bien qu'ils ignorent pourquoi cette

Paléogénétique

Au moins deux origines à l'agriculture

L'agriculture est née au Moyen-Orient durant le Néolithique. Pour préciser où ce mode de vie sédentaire est né et comment il s'est diffusé, Marjan Mashkour, du CNRS et du Muséum national d'histoire naturelle, et ses collègues ont comparé l'ADN d'individus de la région de cette époque à des populations modernes. La chercheuse nous explique ses résultats.

barrière s'ouvre et se ferme dans la pathologie, ils ont identifié des récepteurs NMDA à la surface des cellules endothéliales chez l'homme et chez la souris (normalement, ces récepteurs sont surtout présents dans le système nerveux).

Il y a quelques années, ils avaient montré que ces récepteurs sont suractivés quand une enzyme, une protéase nommée tPA, s'y fixe et les coupe. Dans un modèle artificiel, *in vitro*, de barrière hématoencéphalique, ces chercheurs ont établi qu'en se liant aux récepteurs NMDA, cette protéase augmente la perméabilité de la barrière. Les chercheurs ont alors créé un anticorps – ils l'ont nommé Glu-nomab – qui bloque l'interaction du tPA avec le récepteur NMDA.

Dans le modèle *in vitro*, cette nouvelle molécule rétablit l'imperméabilité de la barrière : les globules blancs ne la traversent plus. Et dans un modèle de souris atteintes de sclérose en plaques, les symptômes moteurs des animaux n'évoluent plus. Dans leur cerveau, on ne trouve presque plus de globules blancs et la myéline est moins altérée. Cela prouve que le Glu-nomab ferme la barrière hématoencéphalique et empêche l'infiltration des agents immunitaires.

On peut donc envisager un médicament pour prévenir les poussées inflammatoires chez les patients, en complément des autres traitements ou quand ces derniers sont inefficaces. Un brevet est d'ores et déjà déposé. Reste à trouver les financements pour développer l'anticorps et lancer les essais cliniques. Claire aura peut-être un nouveau médicament pour combattre sa maladie.

Bénédicte Salthun-Lassalle

R. Macrez et al., *Brain*, en ligne le 20 juillet 2016

Où l'agriculture s'est-elle développée en premier ?

Marjan Mashkour :

L'agriculture est apparue il y a environ 10 000 ans, avec la culture des céréales et l'élevage des ongulés (chèvre, mouton, bœuf et porc), parmi des populations néolithiques du Zagros (en Iran), de la région de la Damascène (en Syrie) et d'Anatolie centrale (en Turquie). L'agriculture s'est propagée ensuite en Europe, dans les deux millénaires suivants.

Les premiers agriculteurs européens étaient-ils les descendants de ces populations ?

M. M. : On le pensait, mais le tableau est plus complexe : les agriculteurs du Zagros se révèlent trop lointains génétiquement des Européens. Ce qui reste valable, c'est que les premiers agriculteurs européens sont probablement issus de l'Anatolie et de la région Égéenne, comme le suggèrent les données génétiques.

Comment avez-vous établi ce résultat ?

M. M. : Nous avons étudié l'ADN préservé dans les os du squelette de quatre individus du Zagros. L'un des individus a été trouvé dans le site de Wezmeh, une grotte qui était un repaire d'hyènes et d'ours. Les os de cet humain figuraient parmi les restes des carnivores. Cet homme était soit mort dans la grotte, soit ses

os y ont été apportés par des charognards. La datation au carbone 14 nous a permis d'estimer que le squelette est vieux d'environ 9 000 ans. Les trois autres individus proviennent de tombes qui ont été fouillées dans un site néolithique iranien, le site de Tepe Abdol Hosein.



Marjan Mashkour, directrice de recherche CNRS/MNHN

Quels éléments vous ont permis de comprendre qu'ils étaient agriculteurs ?

M. M. : Les individus de Tepe Abdol Hosein ont été trouvés sur un site néolithique riche présentant de l'outillage lithique en silex (faucilles), des meules en pierre pour moudre les grains, des restes végétaux carbonisés de céréales domestiques et des restes d'animaux pour certains domestiqués, telle la chèvre. Ces gens cultivaient donc des végétaux et pratiquaient l'élevage. Par ailleurs, les analyses isotopiques de carbone et d'azote à partir du collagène extrait des os permettent de reconstituer le régime alimentaire des individus. Ces analyses ainsi que l'état des dents

indiquent un régime riche en céréales.

Comment les génomes permettent-ils de retracer la propagation de l'agriculture ?

M. M. : Les résultats paléogénétiques ont été comparés aux génomes de différentes populations et ethnies modernes et anciennes d'Asie et d'Europe. Les hommes préhistoriques du Zagros semblent apparentés aux populations de l'actuelle région Pakistan-Afghanistan-Inde et surtout aux Zoroastriens (le zoroastrisme est une religion iranienne préislamique).

Ils ne sont donc pas connectés aux Européens ?

M. M. : En effet. Nos travaux montrent qu'il y avait au Moyen-Orient au moins deux foyers ou populations génétiquement différentes d'agriculteurs néolithiques. L'une, en Anatolie, semble à l'origine des premiers agriculteurs européens, l'autre, celle du Zagros, est apparentée à des peuples d'Asie du Sud. La distance génétique laisse penser qu'ils n'ont pas eu de contacts et ne se sont pas mélangés. Mais la diffusion de l'agriculture ou son invention simultanée en plusieurs endroits est une question complexe à laquelle il est encore difficile de répondre de façon sûre.

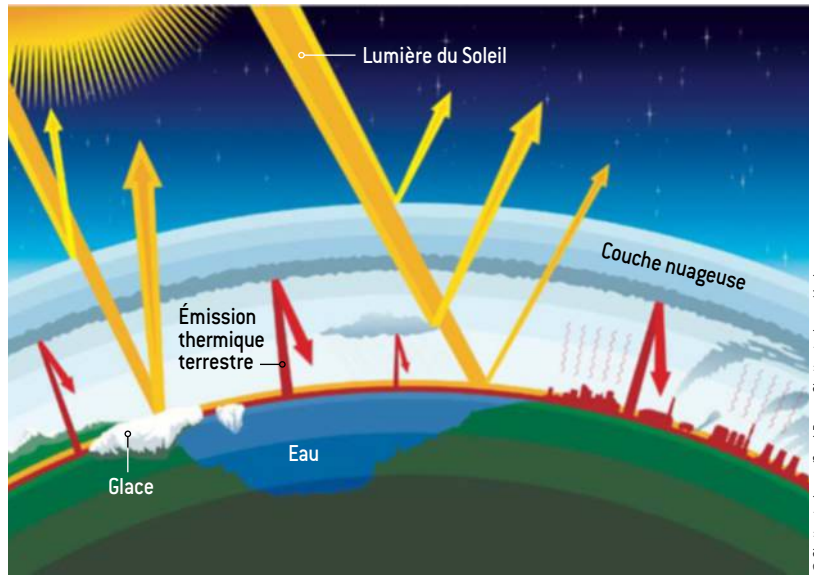
William Rowe-Pirra

F. Broushaki et al., *Science*, en ligne le 14 juillet 2016

Climatologie

Le réchauffement climatique change la couverture nuageuse

Des changements dans la répartition planétaire des nuages étaient prédits par les simulations numériques. Des programmes d'observation par satellites les ont mis en évidence.



© Shutterstock.com/SarahBarry - Shutterstock.com/taulon

Les nuages réfléchissent une partie du rayonnement solaire (en jaune) et retiennent les émissions thermiques de la Terre (en rouge). Ils contribuent aux changements climatiques, qui à leur tour influent sur la couverture nuageuse.

400 ppm

Ce seuil symbolique de la concentration atmosphérique de CO₂ a été dépassé en 2016 à l'île d'Amsterdam, dans l'océan Indien *

Les nuages jouent un rôle actif dans le climat de la planète, mais les changements climatiques actuels exerceraient aussi leur influence sur eux. Les masses nuageuses contribuent aux échanges thermiques de la Terre : elles réfléchissent une partie de la lumière du Soleil vers l'espace et limitent les pertes thermiques du globe. Mais comment sont-elles modifiées par le réchauffement climatique ? Des simulations suggéraient que leur distribution en latitude pourrait être altérée. Joel Norris, de l'université de Californie à San Diego, et son équipe l'ont confirmé.

Ces chercheurs ont utilisé les données recueillies entre 1983 et 2009 par deux programmes d'observation de la Terre, ISCCP et PATMOS-x. Les relevés mettent en évidence des changements dans les motifs de la répartition des nuages au cours des dernières décennies.

Ainsi, les couloirs atmosphériques dans lesquels se déplacent les tempêtes se décalent vers les pôles, tandis que les zones subtropicales arides, dépourvues de

nuages pluvieux, s'étendent ; et le sommet de la couche nuageuse est de plus en plus haut.

Par ailleurs, les chercheurs ont relié ces données à l'évolution de l'albédo (le caractère réfléchissant d'une surface) de la planète, directement lié à la présence de nuages. Ils ont ainsi constaté que la quantité de nuages a augmenté au nord-ouest de l'océan Indien et sur une ligne nord-ouest/sud-est dans la partie australe de l'océan Pacifique.

Ces changements sont-ils la conséquence d'une variabilité naturelle des systèmes nuageux ou bien du réchauffement climatique comme le suggèrent les simulations ? Pour évaluer la première hypothèse, les climatologues ont examiné les tendances de l'évolution de la couverture nuageuse sur des périodes de vingt-sept ans dans des simulations climatiques portant sur 15000 ans, avec des conditions qui correspondent à celles de l'ère préindustrielle (notamment une concentration de CO₂ inférieure de moitié à celle d'aujourd'hui). Ils ont constaté

qu'aucune de ces périodes ne ressemble, sur le plan de la couverture nuageuse, à celle allant de 1983 à 2009. Cette absence de similitude suggère que le réchauffement climatique provoqué par l'activité humaine et les émissions de gaz à effet de serre sont à l'origine de l'évolution de la distribution des nuages actuellement observée.

Quelles sont les conséquences de ces modifications ? L'expansion des zones subtropicales arides pose des problèmes aux populations locales confrontées à des pénuries en eau. Par ailleurs, ces zones, dépourvues de nuages, réfléchissent moins le rayonnement solaire. Enfin, la hausse du sommet de la couche nuageuse augmente l'effet de serre. Pour Joel Norris, ces reconfigurations de la couverture nuageuse, qui contribuent au réchauffement climatique, se poursuivront dans les années à venir en raison d'une concentration toujours croissante des gaz à effet de serre dans l'atmosphère.

W. R.-P.

J. R. Norris et al., *Nature*, en ligne le 11 juillet 2016

* Source : <http://www2.cnrs.fr/presse/communiqu/4585.htm>

Biophysique

Le céphalopode voit les couleurs... sans les voir !

Les seiches, pieuvres et poulpes ont plus d'un tour dans leur sac. Ces mollusques marins sont capables de modifier la coloration de leur peau pour se camoufler. Mais comment font-ils pour s'adapter aux couleurs environnantes alors que la rétine de leurs yeux ne distingue pas les couleurs ? Alexander et Christopher Stubbs, de l'université de Californie à Berkeley, suggèrent qu'ils exploitent un phénomène optique : l'aberration chromatique.

La rétine des yeux de ces animaux ne présente qu'un type de photorécepteurs (l'homme en a plusieurs) et ne peut donc pas distinguer les couleurs. Cependant, la pupille de l'œil est désaxée et est en forme de U. Cette structure maximise la séparation des couleurs, aux dépens de la résolution de l'image, par le phénomène d'aberration chromatique. Ce dernier survient lorsqu'un rayon lumineux traverse une lentille loin de l'axe central : les différentes longueurs d'onde qui le composent convergent alors à



Chez les céphalopodes, les couleurs interviennent dans le camouflage, l'accouplement, l'intimidation... Pourtant, la rétine de leurs yeux ne les distingue pas ! Leur système visuel utiliserait un autre stratagème.

des distances différentes, ce qui provoque l'apparition de bandes colorées sur les bords de l'image.

Selon l'hypothèse des deux chercheurs, les céphalopodes ajusteraient la focale de leurs yeux, c'est-à-dire la distance entre la lentille et le point de convergence des rayons lumineux, pour détecter les différentes longueurs d'onde de la lumière. Ils reconstitueraient ainsi une image en couleur de leur environnement. Pour étayer leur hypothèse, les chercheurs ont mis au point un

modèle informatique de l'œil d'un céphalopode et ont montré que leur proposition fonctionne. Mais il reste à comprendre comment ces mollusques ajustent la focale.

Pour Alexander Stubbs, ce phénomène suggère que la forme complexe des yeux des céphalopodes est issue d'un cheminement évolutif différent de celui des yeux des vertébrés, ce qui explique pourquoi leur mode de perception des couleurs n'est pas le même.

W. R.-P.

PNAS, vol. 113(29), pp. 8206-8211, 2016

Un mutualisme sauvage

« Il en faut peu pour être heureux : quelques rayons de miel et de soleil » chante Baloo dans *Le Livre de la jungle*. Cet adage n'a jamais été aussi vrai que pour les chasseurs de miel de la tribu Yao, au Mozambique, et pour les grands indicateurs (*Indicator indicator*), des oiseaux qui les aident à dénicher les ruches dans les arbres.

La biologiste Claire Spottiswoode, de l'université de Cambridge, et ses collègues ont montré qu'un son spécifique émis par les chasseurs de miel mozambicains est à la base de cette coopération.

Sur plusieurs sons testés, c'est celui utilisé traditionnellement par les chasseurs de miel qui mobilise le mieux les oiseaux. Les humains récupèrent alors le miel et laissent la cire d'abeille, pour le plus grand bonheur de leurs guides à plumes.

Cette coopération est un exemple rare de mutualisme entre des humains et des animaux sauvages en liberté et montre que ces derniers interprètent correctement un signal donné par un humain. Jusqu'à présent, cela n'avait été observé qu'avec des animaux domestiqués, tels que les chiens ou encore les faucons.

Neurobiologie

Des oméga-3 contre le stress

Nous ne sommes pas égaux face au stress ; certains réagissent bien, d'autres perdent leurs moyens et deviennent anxieux. D'où viennent ces différences ? Des chercheurs de l'Inra et de l'Inserm ont identifié un mécanisme cérébral de résistance au stress chez les souris, ainsi qu'un facteur de résilience : les oméga-3, les « bons » acides gras que l'on trouve dans les poissons gras, les noix, le colza...

Les chercheurs ont induit un stress chez des souris en les plaçant en compagnie d'un mâle agressif. Malgré le stress, la moitié des rongeurs ne développaient pas de comportements anxieux,

tels qu'éviter d'explorer un lieu inconnu. Les neurobiologistes ont analysé leur noyau accumbens, une structure cérébrale qui régule les émotions et où interviennent les endocannabinoïdes. Ces molécules proches du cannabis sont produites naturellement dans le cerveau, en particulier quand on consomme des oméga-3. Elles participent à la plasticité synaptique, c'est-à-dire à la force des connexions entre neurones, *via* un mécanisme dit de dépression à long terme (LTD).

Résultat ? Chez les souris normales, les endocannabinoïdes provoquent la LTD dans tous les neurones. Or cette plasticité ne concerne plus que 55 % des

neurones chez les souris stressées non anxieuses, et seulement 11 % chez les rongeurs stressés et anxieux. Or en stimulant la production d'endocannabinoïdes chez les souris anxieuses, les chercheurs ont rétabli la LTD, et ces animaux se sont apaisés.

Cela prouve que les endocannabinoïdes, que nous ne produisons pas tous en même quantité, améliorent la résistance au stress, tout comme les oméga-3 qui augmentent leur sécrétion cérébrale. Ces acides gras n'ont pas fini d'être « bons » pour la santé.

B. S.-L.

Cl. Bosch-Bouju et al., Cell Reports, vol. 16, pp. 1-6, 2016



Les oméga-3 nous aideraient à mieux gérer les situations stressantes. Une nouvelle bonne raison pour en consommer.

La 3^e lune disparue de Mars

Le voile se lève sur l'origine de Phobos et Déimos, les deux satellites de Mars. Des simulations numériques menées par l'équipe de Pascal Rosenblatt, de l'observatoire royal de Belgique, montrent que ces lunes seraient nées de la collision entre la planète rouge et un autre corps céleste, de la même façon que la Lune. Et que les deux corps célestes se seraient formés à partir des débris du disque d'accrétion, grâce à l'influence d'un autre satellite – une troisième lune, donc – qui se serait ensuite écrasé sur Mars.

Parkinson et auto-immunité

Le système immunitaire reconnaît les cellules de l'organisme grâce aux antigènes qu'elles exhibent à leur surface. PINK1 et la parkine, deux protéines dont l'implication dans la maladie de Parkinson est déjà connue, régissent la présentation d'antigènes originaires des mitochondries (éléments producteurs d'énergie dans la cellule) des neurones. Michel Desjardins et ses collègues, de l'université de Montréal, ont montré que si des mutations touchent ces deux protéines, les cellules immunitaires détruisent les neurones. La maladie serait donc auto-immune.

Cœur et sentiment de soi

Comment développons-nous le sentiment conscient d'être au monde, en tant qu'entité unique, nous qui sommes un assemblage hétéroclite de milliards de cellules ? Certains chercheurs pensent qu'un réseau cérébral particulier, qui surveille en permanence les organes internes du corps, sous-tend le sentiment de soi. Mariana Babo-Rebelo et ses collègues de l'ENS, à Paris, en ont pour la première fois apporté une preuve expérimentale : ils ont montré que plus ce réseau cérébral répond fortement à nos battements de cœur, plus nos pensées spontanées sont centrées sur nous-même.

Botanique

Le ménage à trois des lichens



© Shutterstock.com/Connie Bankus

Les lichens semblent être des associations symbiotiques de trois, et non deux, organismes.

Après plus d'un siècle d'études, il semblait établi que les lichens sont issus d'une symbiose entre un champignon et un (voire plusieurs) organisme photosynthétique – algue ou cyanobactérie. Cependant, les travaux de Toby Spribille, chercheur à l'université de Graz, en Autriche, et ses collègues indiquent que la symbiose qui constitue les lichens serait plutôt un ménage à trois entre l'organisme photosynthétique, le champignon et... une levure.

L'analyse de l'ensemble des molécules d'ARN présentes dans le cortex (la couche extérieure) de deux espèces de lichen du genre *Bryoria* a révélé que ces molécules proviennent de la transcription de l'ADN de l'algue et du champignon en symbiose, mais aussi

d'une levure basidiomycète. Toby Spribille et ses collègues ont alors voulu savoir si cette levure est spécifique aux lichens examinés ou si on la retrouve dans d'autres espèces. Ils ont découvert que chaque lichen étudié (à quelques exceptions près) est associé à une levure d'espèce différente.

La levure est-elle un contaminant du lichen ou membre à part entière de la symbiose ? La découverte interroge sur la définition même des lichens. Et comme on connaît des cas où plusieurs algues sont associées à un lichen, pourrait-il y avoir aussi plusieurs champignons dans un même lichen ? D'autres surprises nous attendent peut-être...

Alice Maestracci

T. Spribille et al., *Science*, en ligne le 21 juillet 2016

Insolite

Le sang des glaciers accélère la fonte des glaces

Le blanc du pôle Nord n'est plus immaculé. L'algue des neiges, aussi nommée le « sang des glaciers », assombrît les glaces de nombreux sites de l'Arctique de son pigment rouge. Liane Benning, de l'université de Leeds, au Royaume-Uni, et ses collègues ont calculé qu'elle diminue d'environ 13 % l'albédo des glaciers de la région durant la saison de fonte. Une donnée à prendre en compte dans la modélisation du réchauffement climatique.



© Liane G. Benning/GFZ

Physique théorique



Première simulation quantique en physique des particules

Une forme rudimentaire d'ordinateur quantique a été utilisée pour imiter, dans le cadre d'une théorie simplifiée, l'apparition de paires particule-antiparticule dans le vide.

En 1982, le physicien américain Richard Feynman suggérait d'utiliser des systèmes quantiques simples et bien contrôlables pour en étudier d'autres nécessitant des calculs qui dépassent les capacités des ordinateurs classiques. Il a été exaucé : pour la première fois, une équipe de l'université d'Innsbruck, en Autriche, a utilisé un « ordinateur quantique » pour simuler un phénomène de physique des particules, à savoir la création de paires particule-antiparticule.

L'objectif, à terme, est de simuler des situations restées mal comprises en chromodynamique quantique (QCD) – la théorie de l'interaction forte qui lie entre eux les quarks. Il s'agit notamment du problème du confinement, propriété selon laquelle un quark n'est pas observable isolément. La QCD est une théorie qui repose sur des symétries, dites de jauge, dont la structure complexe rend les calculs difficiles – d'où l'intérêt de la simuler.

De nombreux progrès ont été réalisés dans le domaine des ordinateurs quantiques, où l'information est codée par des

bits quantiques, ou qubits. Un tel élément peut être dans plusieurs états à la fois, contrairement à un bit classique dont l'état (0 ou 1) est unique. Les physiciens savent aujourd'hui réaliser des ordinateurs quantiques élémentaires constitués d'un petit nombre d'atomes (des atomes ultrafroids, des ions dans des pièges électromagnétiques, etc.). L'équipe de Rainer Blatt et Peter Zoller a conçu un tel dispositif avec quatre ions de calcium alignés dans un piège électromagnétique.

Ce système présente une analogie mathématique avec le modèle de Schwinger, une version simplifiée de l'électrodynamique quantique (ou QED, la théorie de jauge qui décrit l'électromagnétisme dans un cadre quantique et qui est moins complexe que la QCD), à une seule dimension d'espace. Cette analogie a permis de simuler l'apparition et la disparition de paires particule-antiparticule en présence d'un champ électrique.

Dans l'expérience, des lasers simulent le champ électromagnétique. Les ions excités par les lasers émettent un rayonnement de

fluorescence, qu'on peut interpréter comme la création d'une particule ou d'une antiparticule. En modifiant les paramètres des lasers, les chercheurs contrôlent l'interaction des ions. Les mesures ont ensuite été comparées aux prédictions du modèle de Schwinger : le simulateur quantique reproduit fidèlement la dynamique de la création de paires.

La théorie simulée est relativement simple et les résultats des calculs théoriques déjà connus, mais cela a permis aux physiciens d'Innsbruck de montrer qu'un simulateur quantique permet d'étudier une théorie de jauge. La prochaine étape consistera à simuler des systèmes de QED en deux ou trois dimensions d'espace pour sonder des interactions plus complexes, puis à simuler des modèles tels que la QCD. De nombreux dispositifs ont déjà été proposés sur le papier. Au vu des progrès techniques dans le domaine des atomes froids et des ions piégés, cette approche pourrait connaître un essor rapide.

Sean Bailly

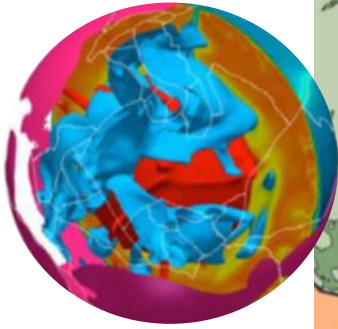
E. A. Martinez et al., Nature, vol. 534, pp. 516-519, 2016

Dans le vide quantique, des paires particule-antiparticule éphémères surgissent et disparaissent sans cesse (vue d'artiste, à gauche). Pour imiter précisément la dynamique de ce phénomène décrite par un modèle simplifié, l'équipe de l'université d'Innsbruck a conçu un simulateur quantique utilisant quatre ions calcium alignés dans un piège électromagnétique et contrôlés avec des lasers (les ions sont placés entre les deux pointes, à droite).

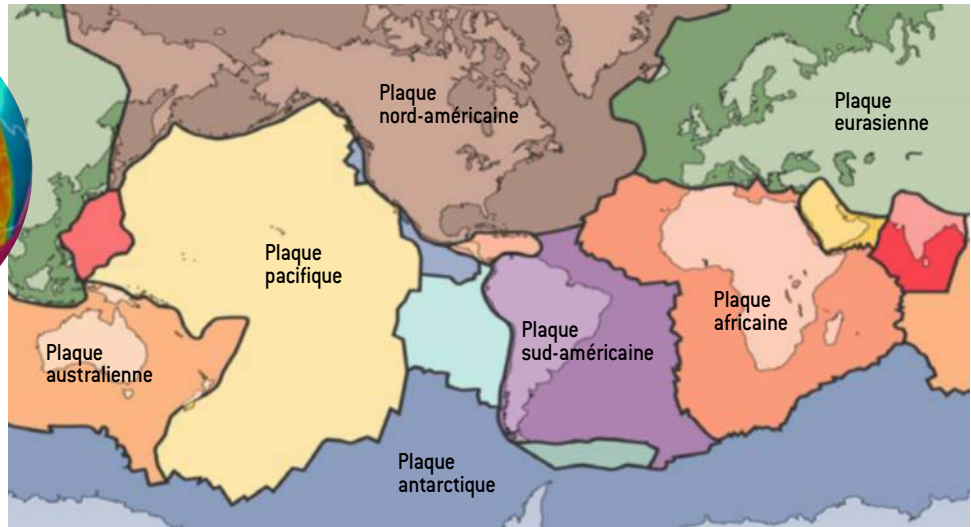
Géophysique

Le puzzle des plaques tectoniques enfin compris

La croûte terrestre est morcelée en un ensemble de grandes et de petites plaques. Cette structure serait le fruit de l'interaction entre les mouvements convectifs du manteau et la résistance de la croûte.



Des simulations de la Terre et de la dynamique convective du manteau (ci-dessus) permettent d'expliquer la part des grandes et petites plaques lithosphériques (seules les plus grandes sont représentées ici).



C. Mallard et al./USGS

La croûte terrestre est un puzzle de 53 pièces, les plaques tectoniques. Ces pièces se classent en deux catégories, les petites et les grandes. Ces dernières sont seulement au nombre de sept, correspondant à l'Amérique du Nord, l'Amérique du Sud, l'Afrique, l'Eurasie, le Pacifique, l'Australie et l'Antarctique. Ensemble, elles couvrent 94 % de la surface du globe. Entre ces grandes plaques, on trouve 46 petites plaques complémentaires. Pourquoi une telle répartition et quels mécanismes ont conduit à ce découpage ? Claire Mallard, du Laboratoire de géologie de Lyon, et ses collègues ont réalisé des simulations numériques de Terres fictives en 3D pour comprendre comment la croûte se découpe.

La surface de la Terre est en perpétuel mouvement. Cette idée fut avancée pour la première fois par Alfred Wegener au début du XX^e siècle, mais la communauté des géophysiciens mit des décennies à accepter sa théorie de la dérive des continents. Dans les années 1950-1960, la théorie a été reformulée en termes de tectonique des plaques : la lithosphère

– la croûte et la partie supérieure du manteau terrestre – se compose de plaques qui se forment au niveau des dorsales océaniques et disparaissent en s'enfonçant dans le manteau dans les zones de subduction. On peut reconstituer le mouvement des plaques grâce aux anomalies magnétiques enregistrées dans la croûte océanique. Mais celle-ci a une courte durée de vie, si bien qu'il est difficile de reconstituer l'histoire géologique au-delà de 100 millions d'années et d'en déduire les mécanismes sous-jacents.

Les simulations des planètes Terre fictives tridimensionnelles effectuées par l'équipe de Claire Mallard incluent une description des mouvements de convection dans le manteau. Ces calculs prennent en compte de nombreux paramètres, tels que la viscosité et la plasticité du manteau.

Les chercheurs ont retrouvé dans leurs simulations une répartition entre grandes et petites plaques équivalente à celle constatée. Cela confirme que la répartition des plaques tectoniques est liée aux interactions entre la convection mantellique et la lithosphère. En particulier,

les chercheurs ont montré que les dimensions des cellules de convection sont comparables à la taille des grandes plaques ; et que les petites plaques se forment préférentiellement près des zones de subduction, là où les plaques, en s'enfonçant dans le manteau, subissent de fortes contraintes.

Jusqu'à présent, les reconstructions de l'histoire géologique étaient fondées sur des approches statistiques. Elles suggéraient que la lithosphère était principalement composée de grandes plaques, il y a 200 millions d'années. Les plaques se seraient morcelées par la suite. D'autres chercheurs pensaient qu'il devait y avoir plus de zones de subduction dans le passé avec davantage de petites plaques, mais sans pouvoir le prouver.

Cette nouvelle étude appuie cette hypothèse et montre que la répartition entre petites et grandes plaques est restée assez stable sur plusieurs centaines de millions d'années. Les précédents modèles surestimaient, pour le passé, le nombre de grandes plaques au détriment des petites.

S. B.

C. Mallard et al., *Nature*, vol. 535, pp. 140-143, 2016

Évolution

Plumes, poils, écailles : une même origine

Le processus de formation des poils des mammifères et celui des plumes des oiseaux présentent des similitudes. Ils débutent par un placode anatomique, un épaississement de l'épiderme, au niveau embryonnaire. Nicolas Di-Poi et Michel Milinkovitch, de l'université de Genève, ont aussi observé ce phénomène chez les reptiles à écailles. Si les placodes n'avaient jamais été repérés auparavant lors de l'embryogenèse de ces animaux, c'est parce qu'ils ne se produisent jamais au même moment et au même endroit. Ce résultat est confirmé au niveau moléculaire, avec des marqueurs similaires et l'implication d'un gène commun chez les oiseaux, les reptiles et les mammifères.

W. R.-P.

N. Di-Poi et M. Milinkovitch, *Science Advances*, en ligne le 24 juin 2016

Neurosciences

Trop de faux positifs avec l'IRMf

L'imagerie par résonance magnétique fonctionnelle (IRMf) a révolutionné les neurosciences en une vingtaine d'années. Fondée sur la modification des propriétés magnétiques des tissus due à l'apport d'oxygène par le sang, cette méthode d'imagerie cérébrale identifie les zones du cerveau en activité, qui sont intensément irriguées. Cependant, une étude dirigée par Anders Eklund, de l'université de Linköping, en Suède, vient remettre en question les résultats de milliers d'articles utilisant cette technique : les principales méthodes de traitement des données issues d'IRMf sous-estiment le risque de faux positifs.

L'obtention d'une carte en 3D des zones actives du cerveau nécessite des traitements statistiques complexes pour extraire les signaux pertinents du « bruit » lié au fonctionnement cérébral au repos. L'analyse s'effectue d'abord sur chaque unité spatiale du cerveau (nommée voxel). Ces voxels sont ensuite regroupés en structures plus larges. Les résultats sont alors présentés avec une tolérance maximale de 5 % de faux positifs. Or Anders Eklund et ses collègues ont montré que ce seuil n'était pas vérifié par trois des principaux logiciels utilisés par les spécialistes.

Martin Tiano

A. Eklund et al., *PNAS*, vol. 113(28), pp. 7900-7905, 2016

Physique

Les vagues d'un miroir temporel

Comment inverser certains processus et reconstituer, par exemple, le vase qui vient de se briser en morceaux ? Si cela semble impossible, plusieurs méthodes ont été développées ces dernières années dans le cas de la propagation des ondes. L'équipe d'Emmanuel Fort et Mathias Fink, à l'institut Langevin (ESPCI-CNRS), apporte une nouvelle pierre à l'édifice.

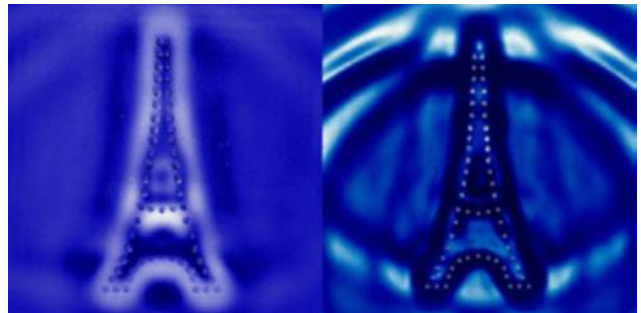
Une technique classique consiste à placer des « antennes » émettrices-réceptrices en divers points d'un milieu où se propage l'onde – qu'elle soit acoustique, électromagnétique ou une ondulation à la surface de l'eau. L'onde est alors enregistrée, traitée puis réémise « à l'envers » par les antennes. Celle-ci va en quelque sorte revivre sa vie passée en se propageant comme si le temps était inversé. C'est le principe des « miroirs à retournement temporel », qui ont de nombreuses applications.

L'équipe d'Emmanuel Fort et de Mathias Fink a trouvé un moyen de se passer de ces antennes. Dans leur dispositif, ils créent une onde dans une cuve d'eau. Au début, l'onde se propage. Puis une forte mais très brève perturbation, ici une accélération verticale de la cuve, dédouble l'onde : l'une des deux ondes résultantes continue de se propager normalement, tandis que la seconde rebrousse chemin et se refocalise sur la source de l'onde initiale. Cette seconde onde équivaut à l'onde initiale qui remonterait le temps.

Que se passe-t-il ? La perturbation fausse les conditions de validité du principe de Huygens-Fresnel qui décrit classiquement la propagation d'une onde. On montre alors que l'onde qui « remonte le temps », normalement détruite par des interférences, peut se former.

S. B.

V. Bacot et al., *Nature Physics*, en ligne le 11 juillet 2016



© V. Bacot et al./Nature Physics

Même en partant d'un motif complexe tel que des ondes engendrées par une petite tour Eiffel placée à la surface de l'eau, le système parvient à réfléchir l'onde et la refocaliser à sa source.

Une planète naine au-delà de Neptune

Provisoirement nommée RR245, une planète naine a été découverte dans la ceinture de Kuiper, au-delà de l'orbite de Neptune. Son diamètre est d'environ 700 kilomètres et sa période de révolution autour du Soleil dure 700 années terrestres. Elle se dirige actuellement vers son périhélie, le point de sa trajectoire le plus proche du Soleil, à 34 unités astronomiques, qu'elle atteindra en 2096. Son orbite est très étirée : son aphélie, le point le plus éloigné, se trouve à 120 unités astronomiques du Soleil.

Une molécule contre trois parasites

La maladie de Chagas, la leishmaniose et la maladie du sommeil touchent 20 millions de personnes dans le monde et en tuent plus de 50 000 chaque année. Les agents responsables sont des parasites unicellulaires similaires. Une équipe internationale dirigée par Frantisek Supek, de

l'Institut de génomique de la fondation Novartis, à San Diego, en Californie, a sélectionné parmi des millions de molécules un composé, noté GN5343, qu'elle a amélioré et testé chez des souris modèles : il se révèle bien toléré et très efficace contre les trois parasites, chez lesquels il perturbe la régulation des protéines.

Suivez les dernières actualités
de Pour la Science
sur les réseaux sociaux



Retrouvez
plus d'actualités sur
www.pourlascience.fr

POINT DE VUE

Il est important de savoir comment l'ignorance est produite

Certains champs du savoir sont délaissés ou, pire, font l'objet de manipulations délibérées. Étudier les mécanismes à l'œuvre et les connaître constituent un enjeu citoyen et de société.

Mathias GIREL

L'ignorance est un thème dont l'importance est désormais reconnue dans le milieu académique, comme en témoigne un épais manuel publié en 2015 (*voir la bibliographie*). Il est temps que les autres acteurs de la société s'en emparent aussi. Car des questions de science ou de technologie s'immiscent de plus en plus dans les problèmes et les choix auxquels sont confrontés nos sociétés et leurs décideurs. Il suffit de penser aux plantes génétiquement modifiées, à l'énergie nucléaire, à l'impact des polluants sur la santé ou au réchauffement climatique.

La question du savoir, ou celle de son absence, est ainsi centrale pour les démocraties. Il s'agit entre autres de donner un accès plus large aux connaissances afin de donner corps à une citoyenneté éclairée. Cela fait de l'ignorance un problème politique. Par ailleurs, en raison de la complexité croissante des phénomènes et des savoirs, il nous faudrait apprendre à vivre et agir en contexte d'ignorance et d'incertitude.

Nous devons d'abord comprendre que l'ignorance offre des visages fort différents. Le plus familier d'entre eux est l'ignorance relative : on peut ignorer ce que d'autres savent. Les secrets industriels ou les secrets d'État, ou encore la méconnaissance d'aspects importants de la vie d'autres communautés sont des exemples d'une telle ignorance. Celle-ci renvoie alors à une répartition plus ou moins

inégal d'un savoir fiable et pose la question du préjudice (intellectuel, sanitaire, éthique, politique...) qui est causé quand une partie de la société n'a pas accès à ce savoir.

L'ignorance peut revêtir un sens plus fort lorsqu'elle renvoie à des attentes vis-à-vis d'une connaissance que personne ne possède encore, mais dont on pense qu'elle pourrait être produite et qu'elle serait utile pour trancher des questions ou conforter des revendications. Tout programme de recherche est, en ce sens, une délimitation d'ignorance intéressante (« Où est la matière noire ? », « À quoi la pandémie actuelle d'obésité est-elle due ? »...).

**Dans certains contextes,
de l'ignorance est créée
par les actions de collectifs,
d'institutions...**

Stuart Firestein, neurobiologiste à l'université Columbia, a ainsi proposé de voir dans l'ignorance le moteur de la science. Le sociologue Scott Frickel, de l'université Brown, et ses collègues ont montré comment des collectifs, par exemple des riverains de sites de production chimique, pouvaient unir leurs efforts pour en appeler à une science qui n'est pas faite (*undone science*), par exemple celle de l'effet d'une exposition à des pics brefs mais intenses de pollution. La mobilisation se déroule autour d'une absence de connaissance, d'une ignorance, que l'on regrette.

On peut enfin choisir de ne pas entamer des travaux de recherche qui semblent trop dangereux, que ce soit par leurs résultats mêmes (par exemple en microbiologie, lorsqu'il y a un risque de produire une bactérie mortelle et très infectieuse) ou par leur instrumentalisation possible (par exemple sur la corrélation éventuelle entre quotient intellectuel et origine ethnique). C'est, dans de telles situations, une forme d'ignorance délibérément choisie.

Au-delà de cette première typologie, qui est à affiner, de nombreux chercheurs s'intéressent à la dynamique de l'ignorance et relèvent que, dans certains contextes, elle peut être « produite », résulter des actions de collectifs, d'institutions ou de cercles de réflexion.

Scott Frickel, en étudiant les réactions des agences environnementales à l'ouragan Katrina survenu en 2005, a ainsi montré comment les instances réglementaires, pour agir, produisaient de l'ignorance en se concentrant sur quelques familles de substances toxiques bien connues, en faisant abstraction des « effets cocktail », en extrapolant les données de produits bien documentés vers ceux qui le sont moins.

Cette ignorance produite à chaque étape n'a pas forcément été voulue ; elle résulte du besoin d'agir et du fonctionnement des institutions. De même, tout programme de recherche, dont le temps et les ressources sont limités, se concentre sur certains champs pour en laisser d'autres en jachère.

Nos intérêts – culturels, commerciaux, politiques – créent ainsi de l'ignorance, du moins de la connaissance qui n'est pas produite.

Certains, tel Robert Proctor, de l'université Stanford – qui a introduit le terme d'agnotologie pour désigner la « production culturelle de l'ignorance et son étude » –, pensent en outre que l'ignorance est parfois produite dans le cadre d'une stratégie délibérée.

Cet historien des sciences a documenté non seulement des dénégations de l'industrie du tabac sur la dangerosité de la cigarette, mais aussi la production de science déviante pour contrer un savoir médical déjà bien constitué, afin de peser sur l'activité réglementaire, l'expertise et la communication de résultats médicaux et épidémiologiques. C'est ainsi que, dans l'espoir de dissimuler la nocivité du tabac, le Comité de recherche de l'industrie du tabac a financé à l'envi des recherches sur à peu près toutes les autres causes du cancer du poumon.

Les historiens des sciences Naomi Oreskes, à l'université Harvard, et Erik Conway, à l'Institut de technologie de Californie, ont instruit un propos semblable à l'égard des climatosceptiques et de la mise en doute de l'origine anthropique du réchauffement climatique par des acteurs ayant des intérêts dans les énergies fossiles. Cette mise en doute équivaut, en pratique, à de l'ignorance, car elle rend inopérante une connaissance pour en déduire d'autres connaissances ou instruire l'action. Dans un cadre voisin, la journaliste française Stéphane Horel a livré une analyse saisissante de la controverse autour des perturbateurs endocriniens.

Dans tous ces cas, une connaissance corroborée a été masquée ou rendue inopérante, ce qui a créé une forme d'ignorance chez les décideurs ou le public. Stratégique dans certains cas, émergente dans d'autres, l'ignorance produite ne se présente cependant pas toujours sous un aspect tranché. Le domaine croissant de la philanthropie en matière de recherche scientifique relève de cette zone grise : ce financement, comme l'a montré la sociologue Linsey McGoey, de l'université d'Essex en Grande-Bretagne, se concentre en général sur des sujets à forte visibilité, en privilégiant, pour des raisons compréhensibles, l'impact le plus fort, le



© Uzfoto / shutterstock.com

DÈS LES ANNÉES 1950, LES INDUSTRIELS DU TABAC ont financé des études dans l'objectif de semer le doute sur les travaux scientifiques montrant que fumer augmente considérablement les risques de cancer du poumon. Des processus analogues de création d'ignorance seraient à l'œuvre concernant par exemple les perturbateurs endocriniens ou l'origine anthropique du réchauffement climatique.

■ L'AUTEUR



Mathias GIREL est maître de conférences au département de philosophie de l'École normale supérieure, à Paris, et dirige le Centre d'archives en philosophie, histoire et édition des sciences (CAPHES, ENS-CNRS).

■ BIBLIOGRAPHIE

M. Gross et L. McGoey (éd.), *Routledge International Handbook of Ignorance Studies*, Routledge, 2015.

R. N. Proctor, *Golden Holocaust - La conspiration des industriels du tabac*, Équateurs, 2014.

N. Oreskes et E. M. Conway, *Les Marchands de doute*, Le Pommier, 2012.

S. Frickel et al., *Undone science: Charting social movement and civil society challenges to research agenda setting*, *Science, Technology & Human Values*, vol. 35(4), pp. 444-473, 2010.

plus rapide et le plus visible possible. C'est parfois au détriment de sujets réputés peu vendeurs, au prix également d'une profonde désorganisation des équipes de recherche antérieures.

L'un des fronts les plus passionnants de la recherche actuelle en sciences humaines se concentre autour de la question de l'intention : dans quels cas sommes-nous fondés à estimer qu'une ignorance résulte d'une stratégie plutôt que d'effets structurels et institutionnels ? Et quelle est notre responsabilité à l'égard de ces angles morts de la connaissance ?

La réponse concerne au premier chef les communautés scientifiques correspondantes. Cependant, les sciences humaines, l'histoire, la sociologie, l'épistémologie, par l'éclairage fin qu'elles donnent des mécanismes de production d'ignorance, peuvent être d'un précieux secours pour les sciences de la nature et les sciences réglementaires face aux instrumentalisation possibles, tout comme elles fournissent des repères décisifs pour le débat public et citoyen autour des sciences. ■



Réagissez au
Point de vue sur
www.pourlascience.fr

HOMO SAPIENS INFORMATICUS chronique de Gilles Doweck

Informatique à l'école : en progrès, doit persévérer

Depuis la rentrée 2016, les élèves ont des cours d'informatique. Reste le problème de la formation des enseignants.



Cette rentrée des classes 2016, en France, est historique, car la refonte des programmes de l'école primaire et du collège introduit un enseignement de l'informatique à tous les niveaux, complétant les enseignements déjà présents au lycée, qui sont également renforcés, et en classes préparatoires. Le moment est bienvenu pour faire le bilan de l'action, concernant l'enseignement de l'informatique, des gouvernements qui se sont succédé pendant cinq ans.

Faire un cours demande quatre ingrédients : des élèves, des programmes, des enseignants et du temps, ce qui nous fournit quatre grilles d'analyse des progrès réalisés.

Les élèves sont ce qui manque le moins. Même quand les enseignements sont optionnels ou électifs, ils sont présents en nombre, qu'ils soient attirés par la discipline elle-même, par ses débouchés professionnels ou par sa méthode pédagogique, qui les met en position d'exercer leur créativité.

Les programmes, nous l'avons dit, viennent d'être modifiés. Et, même si tout est toujours améliorable, ils ont le mérite de proposer une progression cohérente et ambitieuse, avec une sensibilisation aux concepts de l'informatique – algorithmes, machines, langage et information – à l'école primaire, un apprentissage de la programmation au collège et une approche plus scientifique au lycée. Tableau d'honneur donc sur ce point.

Sur la question du recrutement des enseignants, les résultats sont moins brillants. Pour avoir, à terme, des professeurs des écoles capables d'enseigner les rudiments

de l'informatique, la seule solution est de l'enseigner dans les écoles supérieures du professorat et de l'éducation, ce qui ne semble pas être la priorité de l'Éducation nationale. Et, malgré un effort substantiel de formation continue, notamment en partenariat avec le projet Class'Code, les solutions pérennes ne sont pas encore au rendez-vous.



L'INTRODUCTION DE L'INFORMATIQUE
dès l'école primaire, en France, est une bonne nouvelle ; mais la réforme n'est pas à la mesure des défis de ce siècle.

Au collège, au lycée et en classes préparatoires, le recrutement des enseignants qui ont appris l'informatique à l'université devrait passer par les traditionnels concours, Capes et agrégation. Cependant, l'Éducation nationale, qui vient pourtant de créer un Capes de japonais, refuse obstinément l'obstacle. Et nous pouvons craindre que la timide création, en 2017, d'une option « informatique » au Capes de mathématiques, en lieu et place d'un véritable Capes d'informatique, ne soit pas à la mesure de l'enjeu, pourtant souligné par le plan présidentiel pour le numérique à l'école.

Sur la question du temps alloué à cet enseignement, les résultats sont encore moins probants : des enseignements optionnels et électifs au lycée, un enseignement partagé entre les mathématiques et la technologie au collège. L'Éducation nationale accumule les rustines, là où une réflexion de fond sur l'évolution des sciences au XXI^e siècle et sur leur place dans notre monde – réflexion pourtant menée par l'Académie des sciences, le Conseil national du numérique, La Main à la pâte, etc. – devrait guider une réforme ambitieuse, pour nous permettre de relever les défis de ce siècle.

Le quinquennat 2007-2012 a permis les réflexions – en coopération avec l'association Enseignement public et informatique et avec ce qui allait devenir la Société informatique de France – qui ont mené à la création de l'enseignement informatique et sciences du numérique à la rentrée 2012. Le quinquennat 2012-2017 a permis la réflexion sur les programmes en vigueur depuis cette rentrée. Espérons alors que le quinquennat 2017-2022 permette d'avancer sur la question du recrutement des enseignants d'informatique et du temps alloué à son enseignement.

Dans l'hypothèse optimiste, il aura donc fallu trois quinquennats pour résoudre un problème simple. Si tel est le cas, nous devrions nous inquiéter de la vitesse d'horloge de nos institutions, qui semble croître moins vite que celle de nos ordinateurs.

Gilles DOWECK est chercheur à l'Inria et membre du conseil scientifique de la Société informatique de France.

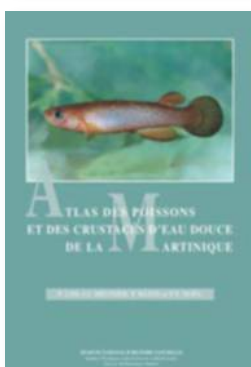
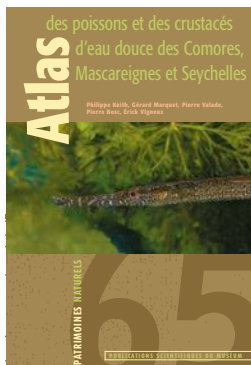
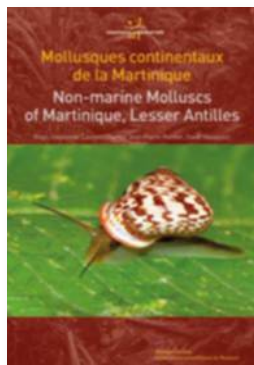
MUSÉUM

NATIONAL D'HISTOIRE NATURELLE

..... biodiversité - eau douce

ESPÈCES DULÇAQUICOLES EN ZONE TROPICALE

Atlas et inventaires



plus de renseignements et de contenus
sur la librairie en ligne des Publications scientifiques

PUBLICATIONS SCIENTIFIQUES DU MUSÉUM ACCÈS PAR PUBLIC MON COMPTE MON PANIER A+ A- FR L'UNIVERS MUSÉUM



INVENTAIRES & BIODIVERSITÉ
Mollusques continentaux de la Martinique
LIRE LA SUITE

ACTUALITÉS PRÉSENTATION DU SERVICE COLLECTIONS PÉRIODIQUES INFOS PRATIQUES LIBRAIRIE

À LA UNE

Bienvenue sur le nouveau site internet des Publications scientifiques du Muséum national d'Histoire naturelle, Paris. Vous trouverez ici l'ensemble des collections et périodiques publiés par le Muséum. Les ouvrages et fascicules de périodiques sont maintenant disponibles à la vente, via la boutique en ligne, ou bien en venant directement sur place ; les articles de périodiques, dans leur version intégrale, sont de nouveau consultables en ligne.

ACTUALITÉS
Nouvelles parutions : Geodiversitas 38 (2), Zoosystema 38 (2), Adansonia 38 (1), Anthropozoologica 51 (1)



Commandez vos ouvrages depuis le **monde entier** sans intermédiaire. Navigation transversale par **Moteur de recherche**, **Thèmes** et **Géozones**.

Téléchargez gratuitement les articles des revues *Geodiversitas*, *Zoosystema* et *Adansonia* (publiés depuis 2000). D'autres revues sont consultables ou référencées...

Composez votre propre sélection en éditant un **catalogue** personnalisé au format PDF (A4).
SCIENCEPRESS.MNH.N.FR

MUSÉUM
NATIONAL D'HISTOIRE NATURELLE
PUBLICATIONS
SCIENTIFIQUES

CABINET DE CURIOSITÉS SOCIOLOGIQUES par Gérald Bronner



À petites structures, meilleurs résultats scolaires ? Méfiance !

Des statistiques peuvent donner l'impression que les petites structures éducatives sont plus efficaces que les grandes.

Voici une question d'actualité alors que la rentrée scolaire se profile : apprend-on mieux dans les petites structures scolaires que dans les grandes ? Une réponse intuitive suggère que oui. Dans un établissement à taille humaine, suppose-t-on, les enfants se sentent plus en confiance ; l'acte d'apprendre et les résultats obtenus ne peuvent donc que s'en trouver améliorés. Cette impression pourrait bientôt être confirmée par des résultats d'enquêtes sur la réussite en milieu scolaire et ancrer un point de vue... erroné.

Ainsi, dans les années 2000, la fondation Bill & Melinda Gates s'est beaucoup intéressée aux questions d'éducation. En particulier, elle a cherché à savoir ce qui faisait qu'une école affichait de meilleurs taux de réussite qu'une autre. Pour ce faire, elle a investi dans la recherche la somme de 1,7 milliard de dollars.

Lors des études menées, l'un des résultats qui retint l'attention était que, parmi les écoles les plus performantes, les petites écoles étaient surreprésentées. Ainsi, sur les 1 662 établissements que comptait la Pennsylvanie, 6 des 50 établissements les plus performants étaient de petite taille, soit 12 %, alors qu'ils ne représentaient que 3 % des écoles de cet État.

Cette enquête a donc incité la fondation Gates et plusieurs autres à investir de l'argent pour réduire la taille des unités pédagogiques. Était-ce une bonne idée ? Pas certain, car il pèse sur l'analyse de ce résultat une importune illusion mentale, nommée par les spécialistes biais de représentativité. Il s'agit de la difficulté que

nous avons d'évaluer la représentativité d'un échantillon.

Pour mieux comprendre cet obstacle intellectuel, voici un petit problème proposé à des sujets par deux célèbres psychologues israéliens, Amos Tversky et Daniel Kahneman, vers 1970.

Une ville a deux maternités : l'une, grande, où 45 bébés en moyenne naissent par jour, et

seraient à égalité. La bonne réponse, que seuls 20 % des sujets ont donnée, était pourtant « la petite maternité ». En effet, plus l'échantillon est grand (ici la grande maternité), plus les chances de se rapprocher de la parité (50 % de filles, 50 % de garçons) sont grandes ; plus il est petit, plus les chances de s'en écarter sont importantes. En d'autres termes, la petite maternité sera celle où il y a le plus de jours où l'on trouvera au moins 60 % de garçons, mais ce sera aussi celle où il y a le plus de jours où les naissances de filles atteignent 60 % ou plus.

De la même façon, concernant l'évaluation des performances des écoles par rapport à leur taille, il est bien vrai que les petites structures seront surreprésentées parmi les équipes les plus efficaces... mais elles le seront aussi parmi les équipes les moins performantes !

C'est exactement ce que découvrirent les statisticiens lorsqu'ils se sont penchés sur les résultats de l'étude de la fondation Gates. Les liens qu'on avait cru pouvoir établir liant taille de l'établissement et performance pédagogique n'avaient donc pas grand sens... Tout simplement parce que plus un échantillon est petit, plus il a de chances de s'éloigner de la moyenne canonique, pour le meilleur ou pour le pire. C'est l'un de ces nombreux exemples où les illusions mentales s'hybrident avec des variables narratives (*small is beautiful*) pour nous raconter des histoires qui nous plaisent, mais qui ne sont pas toujours exactes. ■



DES ENQUÊTES STATISTIQUES
peu soigneuses peuvent, à tort, confirmer l'impression que les écoles de petite taille sont plus performantes.

l'autre, petite, où 15 naissances en moyenne ont lieu chaque jour. Bien entendu, 50 % (ou presque) des bébés sont des garçons. Cependant, au jour le jour, ces proportions ne sont pas strictement respectées. Chaque maternité note les jours où elle a plus de 60 % de naissances masculines. Quelle maternité détiendra, au bout d'une année, le record de jours où naissent plus de 60 % de garçons ? La grande ? La petite ? Ou encore devraient-elles être, selon vous, à égalité ?

Sur cette question, 56 % des sujets interrogés ont considéré que les deux maternités

© Monkey Business Images / Shutterstock.com



Abonnez-vous à POUR LA SCIENCE

Plus de
24%
de réduction

OFFRE LIBERTÉ
4,90€
PAR MOIS
SEULEMENT

BULLETIN D'ABONNEMENT

À renvoyer accompagné de votre règlement à : Pour la Science - Service abonnements - 19 rue de l'Industrie - BP 90 053 - 67 402 Illkirch cedex

PAS467

☒ **OUI**, je m'abonne à *Pour la Science* formule Découverte.
Je règle par prélèvement automatique de 4,90€ par mois et
je complète l'autorisation ci-contre. **J'économise 24% par mois.**
(IPV4E90)

MES COORDONNÉES

Nom : _____

Prénom : _____

Adresse : _____

Code postal _____

Ville : _____

Tél. Pour le suivi client (facultatif) : _____

E-mail obligatoire : _____

@ _____

J'accepte de recevoir les informations de *Pour la Science* ☐ OUI ☐ NON
et de ses partenaires ☐ OUI ☐ NON

Délai de livraison: dans le mois suivant l'enregistrement de votre règlement. Offre réservée aux nouveaux abonnés, valable jusqu'au 30/09/16 en France métropolitaine uniquement. Pour un abonnement à l'étranger, merci de consulter notre site www.pourlascience.fr. Conformément à la loi "Informatique et libertés" du 6 janvier 1978, vous disposez d'un droit d'accès et de rectification aux données vous concernant en adressant un courrier à *Pour la Science*. Votre abonnement en prélèvement est reconduit automatiquement et peut être interrompu par simple lettre.

MANDAT DE PRÉLÈVEMENT SEPA En signant ce mandat SEPA, j'autorise Pour la Science à transmettre des instructions à ma banque pour le prélèvement de mon abonnement dès réception de mon bulletin. Je bénéficie d'un droit de rétractation dans la limite de 8 semaines suivant le premier prélèvement. Plus d'informations auprès de mon établissement bancaire.

TYPE DE PAIEMENT : PAIEMENT RÉCURRENT

Titulaire du compte

Nom : _____

Adresse : _____

Code postal _____ Ville : _____

Désignation du compte à débiter

BIC (Identification internationale de la banque) _____

IBAN _____

(Numéro d'identification international du compte bancaire)

Établissement teneur du compte

Nom : _____

Adresse : _____

Code postal _____ Ville : _____

Date et signature

Organisme Créancier

Pour la Science - 8 rue Férou - 75006 Paris

N° ICS FR92ZZZ426900

N° de référence unique de mandat (RUM)

Joindre un RIB

Partie réservée au service abonnement. Ne rien inscrire

Les **MATHS** de Grothendieck

Alexandre Grothendieck, né en 1928 et décédé en 2014, a marqué le XX^e siècle. Mathématicien hors normes et au destin peu commun, il a, par ses idées et concepts élaborés dans les années 1950 et 1960, radicalement changé la façon d'aborder les problèmes de la géométrie algébrique et de la topologie, mais aussi ceux de la théorie des nombres et de la logique. Aujourd'hui, ses travaux inspirent toujours bien des mathématiciens. C'est à un voyage au cœur des réflexions et de l'œuvre de ce génie, à la personnalité intransigeante et tourmentée, que nous vous invitons ici.

– Marie-Neige Cordonnier

22 Un génie des maths devenu ermite
par Winfried Scharlau

30 Un héritage mathématique fertile
par Jean Malgoire

38 Un écrivain en quête de vérité
par Leïla Schneps

Un GÉNIE des maths devenu ermite

Une jeunesse marquée par la guerre, la gloire scientifique, une fin de vie en solitaire et empreinte de mysticisme : tel était le destin fort singulier d'Alexandre Grothendieck, l'un des plus brillants mathématiciens du XX^e siècle.

Winfried Scharlau

L'ESSENTIEL

- Fils d'un anarchiste russe et d'une marginale allemande, longtemps apatride, Alexandre Grothendieck grandit dans divers refuges en Allemagne puis en France.
- Durant l'après-guerre, il s'imposa comme l'un des plus grands mathématiciens du siècle. Il développa une nouvelle vision de sa principale discipline, la géométrie algébrique.
- En 1970, il tourne subitement le dos à la recherche. Il s'intéresse à l'écologie radicale, puis part définitivement vivre reclus, limitant au strict minimum ses contacts avec le monde.

Cet immense mathématicien du XX^e siècle est resté pratiquement introuvable pendant plus de vingt ans : Alexandre Grothendieck s'était coupé de presque tout contact humain depuis 1991. Le grand public n'entendit reparler de lui qu'à sa mort, le 13 novembre 2014, dans le sud de la France. Ce fut la fin d'une vie extraordinaire à tous égards.

Le père de Grothendieck, Alexander «Sascha» Schapiro, était un anarchiste russe et juif qui avait rejoint à l'âge de 15 ans des groupes en lutte contre le régime tsariste. Emprisonné en 1907, condamné à mort, il fut conduit quotidiennement, et pendant des semaines, sur la place d'exécution avant que sa peine ne fût commuée en prison à perpétuité en raison de son jeune âge. Il passa les dix années suivantes dans des camps et prisons russes. Libéré lors de la révolution d'Octobre, il fut à nouveau capturé, mais cette fois par l'Armée Rouge. Condamné à mort une fois de plus, il réussit à s'évader pour Berlin, où il gagna sa vie en tant que photographe de rue.

Là-bas, Alexander Schapiro fit la connaissance de la journaliste, actrice et écrivaine

Johanna (Hanka) Grothendieck. Issue d'une famille aisée de Hambourg, elle s'était émancipée très jeune du monde bourgeois et menait une vie errante chaotique. Alexandre Grothendieck, le fils qu'elle eut avec Schapiro, vint au monde le 28 mars 1928.

Avec l'arrivée au pouvoir des nazis, Schapiro émigra en France. Il prit part à la guerre civile espagnole, fut interné en France en tant que vétéran d'Espagne et livré à l'Allemagne en août 1942. Il fut immédiatement conduit à Auschwitz où on l'envoya sans doute directement à la chambre à gaz. Hanka Grothendieck avait suivi son compagnon en France et en Espagne, et passa la guerre dans des camps français. De 1945 jusqu'à sa mort, en 1957, elle vécut la plupart du temps avec son fils et connut ainsi l'ascension fulgurante de celui-ci.

Le petit Alexandre passa les premières années de sa vie parmi des anarchistes, marginaux, prophètes itinérants, émigrants d'Europe de l'Est et autres existences atypiques. Lorsque ses parents se rendirent en France en 1933, ils le confièrent à la famille du pasteur Heydom, à Hambourg. Ce furent ses seules années de vie rangée.



© Peter Budge/Tippos! In cop. with HLFF - all rights reserved 2016

MATHÉMATICIEN D'EXCEPTION, Alexandre Grothendieck a révolutionné la géométrie algébrique. Mais il a tourné le dos au milieu scientifique et a ensuite vécu en ermite, comme l'illustre cette photographie prise quelques mois avant son décès, en 2014.

En 1939, alors que le danger d'être « à moitié juif » le guette, les Heydorn l'envoient rejoindre ses parents en France. Peu après le début de la guerre, sa mère et lui sont internés dans des camps français en tant qu'« étrangers indésirables ». En 1942, Grothendieck trouve refuge dans le village du Chambon-sur-Lignon, où il suit sa scolarité jusqu'au baccalauréat. À partir de 1945, il étudie les mathématiques à l'université de Montpellier, financé par une petite bourse d'aide aux réfugiés, mais aussi en faisant les vendanges et divers petits emplois.

À Montpellier, les cours sont si vieillots que Grothendieck décide de se former en autodidacte. Au printemps 1948, il monte à Paris où il rencontre de grands mathématiciens : les aînés Henri Cartan, Jean Leray, Jean Dieudonné, Claude Chevalley et André Weil, ainsi que ceux de sa génération, Jean-Pierre Serre, Pierre Cartier et François Bruhat. Au cours du célèbre séminaire de Cartan, il s'approprie les mathématiques les plus récentes à une vitesse impressionnante, malgré sa médiocre formation. En 1949, Grothendieck se rend à Nancy, auprès des mathématiciens alors déjà célèbres Laurent Schwartz et Jean Dieudonné.

■ L'AUTEUR



Winfried SCHARLAU est professeur de mathématiques émérite à l'université de Münster, en Allemagne.

Ainsi commence une période de vingt et un ans de sa vie presque entièrement dévouée aux mathématiques. On raconte souvent une anecdote sans doute un peu exagérée mais certainement vraie pour l'essentiel. Peu de temps après son arrivée, Grothendieck demande à Schwartz un sujet de thèse. Schwartz, qui venait d'être récompensé par la médaille Fields – un équivalent du prix Nobel, pour les mathématiques – lui confie un article qu'il venait de publier avec Dieudonné et qui contenait une liste de quatorze problèmes irrésolus. Il lui suggère de commencer par se familiariser avec un ou deux problèmes. L'étudiant, complètement inconnu, d'origines mystérieuses et dont la seule certitude qu'on avait de lui était que sa formation était très lacunaire, disparaît et revient quelques semaines plus tard en ayant résolu la moitié des problèmes. Il s'occupe de l'autre moitié en quelques mois supplémentaires, au cours desquels il ne demande conseil à personne.

À partir de là, il devint clair que Grothendieck était un mathématicien de tout premier plan. Sous l'influence de Schwartz et Dieudonné, il s'intéressa à l'analyse fonctionnelle. Cette branche des mathématiques consacrée aux fonctions considère celles-ci

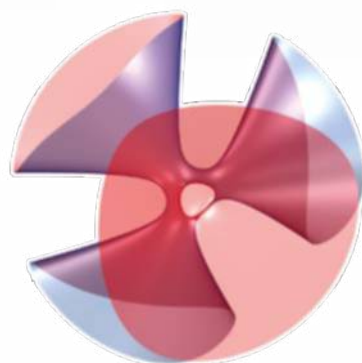
Sans titre
Kurt Ballay



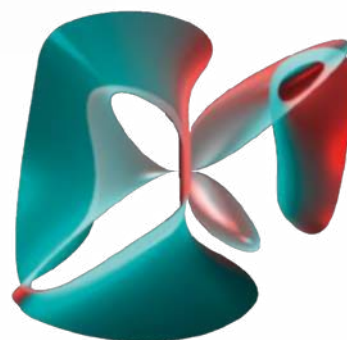
Inclination
Hiltrud Heinrich



Octaèdre concave
Gerhard Brunthaler



Surface diagonale de Clebsch'sche
Hermann Bauer



Porolohmanella
Eduard Baumann

LES SURFACES ALGÈBRIQUES sont définies par des équations polynomiales dont les coefficients sont des nombres réels. Les quelques exemples présentés ici ont été produits lors d'un concours organisé par la revue allemande *Spektrum der Wissenschaft*. Ces figures illustrent la

diversité des surfaces algébriques, finies ou infinies, composées d'un ou plusieurs morceaux, avec des pointes ou des auto-intersections, etc. Les travaux en géométrie algébrique ont permis de classer et de mettre de l'ordre dans cette classe d'objets et d'autres.

comme des points d'un espace de dimension infinie. Lorsqu'on ne connaît pas la fonction qui résout un problème (par exemple une équation différentielle), ou même lorsqu'on ignore si cette solution existe, il est parfois possible de trouver une suite de fonctions qui s'approche de mieux en mieux de la solution. Si ces fonctions étaient des points d'un espace de dimension finie (par exemple notre espace usuel à trois dimensions), on pourrait essayer de donner une certaine forme à la suite des approximations, de sorte qu'elle ait alors une limite qui soit la solution du problème initial. Mais il n'est pas évident de généraliser la notion de limite aux espaces de fonctions, de dimension infinie.

Au tout début de sa carrière, Grothendieck aspirait déjà à la plus grande généralité possible. Dans sa thèse soutenue en 1953, il introduisit ainsi un nouveau type d'espaces de fonctions, les « espaces nucléaires », caractérisés par le fait que les suites d'éléments de ces espaces et leurs limites s'y comportent essentiellement comme dans un espace de dimension finie.

En tant qu'apatride, Grothendieck eut des difficultés à trouver un poste en France après son doctorat. Par l'intermédiaire de Schwartz, il se rendit ainsi à Sao Paulo (Brésil), puis à Lawrence (Kansas, États-Unis), où on lui offrit des conditions de recherche favorables. Vers 1954-55, peu avant son retour à Paris, il abandonna brusquement et radicalement l'analyse fonctionnelle et se tourna vers la géométrie algébrique. D'une façon qui lui était tout à fait caractéristique, il ne se rua pas immédiatement sur des problèmes concrets de son nouveau domaine de recherche, mais chercha d'abord à rénover et reconstruire une théorie-outil, l'algèbre homologique.

La géométrie algébrique s'occupe des propriétés géométriques d'objets définis par des équations algébriques, c'est-à-dire des équations où les variables ne sont combinées entre elles que par des additions, des soustractions et des multiplications. Les plus simples de ces « variétés algébriques » sont des courbes planes définies par des équations à deux variables réelles. Par exemple, dans le plan muni des coordonnées (x, y) , l'ensemble des points satisfaisant l'équation $x^2 + y^2 = 1$ est le cercle centré en l'origine et de rayon 1, l'équation $y - x^2 = 0$ correspond à une parabole et l'équation $xy - 1 = 0$ représente une hyperbole.

En trois dimensions, une variété algébrique décrite par une équation en x, y et z

est, en général, une surface. L'informatique permet de visualiser de telles surfaces (voir les figures page ci-contre). Même si ces nombreuses et belles images n'ont pas fait sérieusement avancer la géométrie algébrique, elles laissent tout de même entrevoir la diversité des formes qui peuvent émerger d'une simple équation : étendues à l'infini ou bornées, constituées d'un ou de plusieurs morceaux, avec des auto-intersections, des pointes affilées comme des aiguilles, ou des trous comme dans le cas d'un tore ou d'un bretzel...

Les débuts d'un long travail de généralisation

En géométrie algébrique, l'objectif est de mettre de l'ordre dans cette diversité. Pour ce faire, on ne considère pas des propriétés « métriques » s'exprimant à l'aide de longueurs et d'angles, mais plutôt des propriétés qualitatives. Ainsi, le cercle et la parabole sont formés d'un morceau, alors que l'hyperbole en compte deux ; le cercle est fini tandis que la parabole et l'hyperbole s'étendent à l'infini ; un tore (la forme d'une chambre à air de pneu) comporte un trou, au contraire d'une sphère.

C'est par le théorème dit de Riemann-Roch que Grothendieck s'est vraiment révélé. Tel qu'il a été énoncé au XIX^e siècle par l'Allemand Bernhard Riemann et surtout par

son élève Gustav Roch, ce théorème fournit une relation entre les zéros et les pôles d'une fonction (les points où la fonction s'annule et ceux où elle devient singulière, infinie) sur une surface de Riemann (une variété complexe de dimension 1, c'est-à-dire un espace dont le voisinage de chaque point est assimilable à un morceau de $\mathbb{C}$, le plan des nombres complexes). La preuve classique se fait par des moyens issus de l'analyse à partir des fonctions différentiables qui décrivent les surfaces algébriques.

En 1953, le mathématicien allemand Friedrich Hirzebruch fit sensation en démontrant une généralisation du théorème de Riemann-Roch aux variétés de dimension supérieure, utilisant pour cela de nouvelles méthodes analytiques et topologiques dérivées des travaux d'Henri Cartan, Jean-Pierre Serre et René Thom.

Grothendieck dépassa ce succès en 1957 avec une généralisation du théorème de portée encore plus grande. Ce coup de génie le propulsa soudain sous les feux de la rampe du milieu mathématique, contrairement à ses résultats en analyse fonctionnelle, qui étaient pourtant également spectaculaires. À la différence de la preuve de Hirzebruch, celle de Grothendieck est purement algébrique. Il en résulte une extension drastique du domaine d'applicabilité du théorème : alors que jusque-là, les équations algébriques définissant une variété ne pouvaient s'appliquer



© IHES/René Baillot

À L'INSTITUT DES HAUTES ÉTUDES SCIENTIFIQUES, haut lieu des mathématiques situé à Bures-sur-Yvette, près de Paris, Alexandre Grothendieck a donné des cours dans les années 1960 et notamment son célèbre « Séminaire de géométrie algébrique », dont les notes seront publiées dans les *Éléments de géométrie algébrique*.

qu'à des variables réelles ou complexes, Grothendieck a remplacé ces ensembles de nombres par des corps quelconques (c'est-à-dire des ensembles où l'on peut définir entre les éléments une addition, une multiplication et son inverse, la division). Ce pas décisif rendra possibles, plus tard, des applications à la théorie des nombres classique.

Par ailleurs, Grothendieck ne s'est pas intéressé uniquement aux variétés isolées, mais aussi à certains morphismes entre deux variétés X et Y . Un morphisme est ce que l'on nomme plus communément une application, c'est-à-dire une relation entre deux espaces, qui à tout point de l'espace de départ associe un point de l'espace d'arrivée. Dans le cas particulier où la variété Y est réduite à un seul point, le théorème de Grothendieck a permis de retrouver la version de Hirzebruch du théorème de Riemann-Roch.

On touche là à un point pour ainsi dire philosophique : ce qui était important pour Grothendieck, ce ne sont pas les objets pris isolément, mais plutôt les relations

(les fonctions, les morphismes...) entre eux (*voir l'encadré ci-dessous*).

La théorie des catégories, qui était à cette époque toute naissante, vise à se situer dans cette même perspective (*voir l'article de Jean Malgoire, pages 30 à 37*). Analogue à la théorie des ensembles, mais plus abstraite encore, elle définit un cadre formel pour construire une théorie mathématique, et désigne les questions fondamentales, dont celle de savoir quels sont les objets d'une théorie ayant des propriétés universelles particulières. S'il est vrai qu'aucun problème profond n'a été résolu à l'aide de la théorie des catégories, elle a amené de l'ordre en géométrie algébrique. Cette approche a mis en évidence que de nombreuses démonstrations indépendantes les unes des autres étaient, en réalité, autant d'applications d'un même résultat tout à fait général en théorie des catégories. Les mathématiciens ont alors établi de nombreux liens, des sortes de dictionnaires, entre des situations qui semblaient *a priori* indépendantes les unes

des autres. De plus, la théorie des catégories a mis l'accent sur les morphismes plutôt que sur les objets, exactement comme ce qu'a fait Grothendieck avec le théorème de Riemann-Roch.

Un institut créé presque que pour lui

En 1958, l'homme d'affaires français Léon Motchane créa près de Paris l'Institut des hautes études scientifiques (IHES), un établissement de recherche comportant une poignée de professeurs permanents, mais un grand nombre de chercheurs invités du monde entier. Dieudonné et Grothendieck y furent les premiers professeurs de mathématiques. Grothendieck y organisa son « Séminaire de géométrie algébrique », lequel attira de nombreux mathématiciens brillants, dont Michael Artin, Pierre Berthelot, Luc Illusie, Michel Demazure et Pierre Deligne. C'est là que fut élaborée la nouvelle géométrie algébrique.

LA GÉOMÉTRIE ALGÈBRE D'APRÈS GROTHENDIECK OU : « QU'EST-CE QU'UN SCHÉMA ? »

L'objet central de la géométrie algébrique revue par Grothendieck n'est pas, comme auparavant, une courbe ou une surface, mais quelque chose de très abstrait et de très général qui porte le nom de « schéma ». D'une certaine façon, on adopte un point de vue supérieur, duquel on peut appréhender d'un regard unifié non seulement la géométrie algébrique classique, mais aussi la théorie des nombres.

Pour ce faire, Grothendieck s'est inspiré des propriétés des objets de la géométrie algébrique classique, les variétés algébriques. À deux dimensions par exemple, ces objets sont les ensembles de points (x, y) qui annulent un certain polynôme, tel $x^2 + y^2 - 1$ pour le cercle ou $x^2 - y^2 - z^2$ pour un paraboloïde hyperbolique (*image ci-contre*). Les polynômes peuvent s'additionner, se soustraire et se multiplier (mais pas se diviser). L'ensemble des polynômes forme un anneau commutatif, c'est-à-dire un ensemble d'objets (les polynômes) dans lequel une addition, une soustraction et une multiplication peuvent

être définies et où, en particulier, la multiplication est commutative (c'est-à-dire que pour deux polynômes quelconques f et g , on a toujours $fg = gf$).

Surtout, à la base, les polynômes sont des fonctions. Ainsi, un polynôme de trois variables associe à tout point (x, y, z) de l'espace un nombre réel (et les points qui sont associés au nombre 0 forment une variété). C'est cette propriété qui a conduit Grothendieck à la notion de schéma.

Première étape

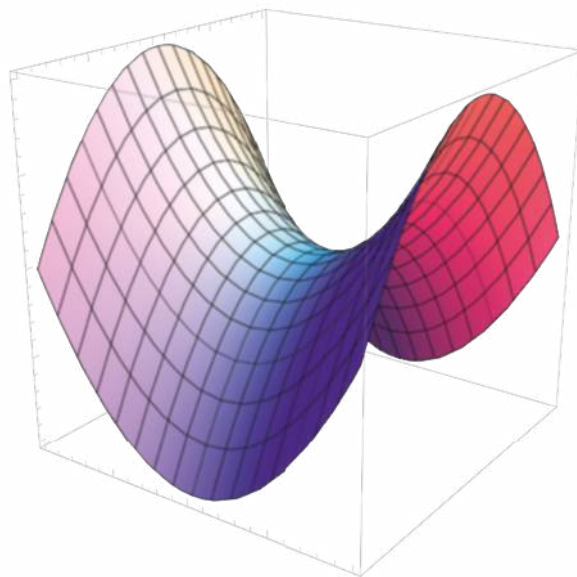
Grothendieck prend des anneaux commutatifs quelconques

comme objets de base. Parmi eux, l'anneau des entiers relatifs $\mathbb{Z} = \{\dots, -2, -1, 0, 1, 2, \dots\}$ joue le rôle que joue le corps des nombres complexes $\mathbb{C}$ pour les anneaux de polynômes.

Deuxième étape

Grothendieck considère alors les éléments d'un anneau

commutatif quelconque comme des « fonctions » (dans un sens très général et à préciser) dont le domaine de définition est nommé le « spectre » de l'anneau (*voir l'article de Jean Malgoire pages 30 à 37*). Par exemple, pour l'anneau des entiers, Grothendieck construit une fonction pour chacun des nombres entiers.



Depuis a moins les années 1960, Grothendieck a adopté une manière de travailler inhabituelle, mais efficace. Il disait lui-même que « penser » et « écrire » ont le même sens et qu'il pouvait taper sur sa machine à écrire au même rythme que défilaient ses pensées. Pendant de nombreuses années, il s'asseyait ainsi tous les jours (ou plutôt toutes les nuits), souvent pendant plus de douze heures, devant sa machine à écrire, et développait ses idées et théories dans une forme très précise, bien que provisoire et encore lacunaire. Plus tard, il retravaillait lui-même ces textes, ou les donnait aux participants de son séminaire qui les figolaient, les rédigeaient et souvent les complétaient après de longues discussions avec lui.

C'est ainsi que se sont constitués le désormais célèbre « Séminaire de géométrie algébrique » et les fondamentaux « Éléments de géométrie algébrique » (EGA), dont la rédaction finale a été entreprise par son ancien professeur Dieudonné. Les EGA sont une œuvre mathématique très inhabituelle. On y

trouve surtout deux types d'énoncés. Les uns affirment que certaines choses sont finiment représentables, c'est-à-dire constructibles en un nombre fini d'étapes à partir d'un nombre fini d'éléments de base. Les autres stipulent que des diagrammes sont commutatifs, c'est-à-dire que l'ordre dans lequel sont appliqués certaines fonctions, constructions, morphismes, etc., n'importe pas.

Il est possible de concrétiser les objets abstraits dont traitent ces théorèmes, mais ce serait considérer là des exemples isolés, et comme Grothendieck le répétait suffisamment, ils ne l'intéressaient pas. Il cherchait toujours à découvrir le cœur d'un problème, à le libérer de toute particularité, de toute hypothèse superflue et d'autres caractères secondaires. Il tendait ainsi toujours vers une plus grande généralité. Grothendieck avait la conviction presque mystique que lorsqu'un problème est vraiment mis à nu et reconnu dans sa nature, sa solution se présente presque d'elle-même, suivant des petits pas, naturels et presque triviaux.

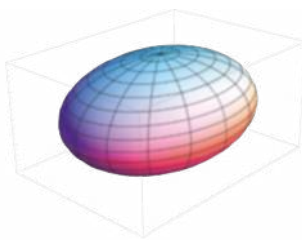
La plupart des personnes qui veulent rendre compréhensibles (à eux-mêmes ou à d'autres) des faits, des principes, des théories ou des problèmes généraux cherchent d'abord un exemple concret, instructif et aussi simple que possible. Grothendieck était complètement étranger à cette idée. Dans l'ensemble de ses travaux de géométrie algébrique, il n'y a aucun exemple. Bien qu'il ne l'ait jamais dit explicitement, il semblait penser que considérer des exemples détourne le regard des vrais principes fondamentaux et du cœur propre des choses. Grothendieck était probablement le seul à avoir cette conviction.

Pour la géométrie algébrique, de grands acquis plus récents, comme la preuve des conjectures de Weil par Pierre Deligne en 1974, la démonstration de la conjecture de Mordell par Gerd Faltings en 1984 et la résolution du grand théorème de Fermat par Andrew Wiles en 1994 auraient été littéralement impensables sans Grothendieck : tous ces travaux s'appuient sur le langage

Ainsi, comme dans l'anneau des polynômes, les éléments d'un anneau commutatif quelconque A deviennent des fonctions dont le domaine de définition est le spectre de A , ou $\text{Spec } A$. À partir de $\text{Spec } A$, Grothendieck définit un ensemble d'anneaux pour lesquels les propriétés trouvées sur A sont valides. Cet ensemble est donné par le « faisceau structural » de $\text{Spec } A$, une notion qui définit un pont entre un espace (ici, $\text{Spec } A$) et un ensemble d'objets (des anneaux) qui se ressemblent. $\text{Spec } A$ et son faisceau structural forment à eux deux une structure nommée schéma affine.

Troisième étape

Grothendieck construit un « schéma » à partir de ces schémas affines (en langage mathématique, un schéma est un espace localement annelé, localement isomorphe à un schéma affine). En pratique, le principe de construction est le même que celui, usuel, qui permet de



construire les variétés. Les surfaces de l'espace à trois dimensions, comme les plans, les sphéroides (ci-dessus), les hyperboloïdes, la surface d'un comète de glace ou d'une bouée ont des formes qui sont globalement très différentes, mais localement, au voisinage de chaque point, elles ont toutes l'aspect d'un disque légèrement déformé. Réciproquement, on peut construire toute surface (et, de façon correspondante, toute variété de dimension supérieure) en prenant assez de disques puis en les recollant de telle façon qu'ils se chevauchent, afin d'obtenir la surface désirée. De façon analogue, un schéma est un

objet global construit par recollement de schémas affines. Là où ceux-ci se chevauchent, ils doivent se correspondre, suivant un sens à préciser. Pour cela, le travail mathématique à faire est minutieux, mais l'idée de base reste simple.

Les travaux de Grothendieck ont rapidement séduit : dès 1964, Heisuke Hironaka, futur lauréat de la médaille Fields, utilise cette construction dans un cours qu'il donne à l'université Columbia.

Depuis le XIX^e siècle, les mathématiciens discutaient pour savoir quel type d'anneaux commutatifs devait être considéré à la base de la géométrie algébrique. La réponse de Grothendieck est aussi simple que stupéfiante : il faut tous les considérer. C'est avec cette réponse qu'a été réussie une refonte complète et cohérente de la théorie, sans détour ni construction *ad hoc*. Grothendieck a tout de suite enregistré un premier succès : le fait de restreindre

l'attention, dans la théorie classique, à des anneaux vérifiant des conditions particulières impliquait la nécessité de restreindre également la classe des morphismes (applications reliant deux ensembles entre eux) entre anneaux que l'on y considérait. En revanche, l'approche catégorique de Grothendieck permettait tout simplement de considérer tous les morphismes, sans restriction.

Puisque les schémas sont une généralisation des variétés algébriques, chaque notion afférente aux variétés peut être reformulée dans le cadre plus général des schémas. Cette approche a permis, par exemple, d'étudier des phénomènes délicats d'arithmétique ou de géométrie qui ne pouvaient être bien compris dans le cadre classique, et notamment de résoudre, comme l'a fait Gerd Faltings en 1983, la conjecture dite de Mordell (sur le nombre de solutions d'une équation polynomiale à coefficients rationnels).

et les outils de la géométrie algébrique tels qu'ils ont été définis par Grothendieck.

En 1970 s'est produit ce que Grothendieck a souvent appelé par la suite le « grand tournant » de sa vie, avec l'abandon de son poste à l'IHES après qu'il eut découvert que cet institut était financé en partie par le ministère français de la Défense, ce qui était incompatible avec ses convictions pacifistes et de gauche.

Cette raison avancée par Grothendieck lui-même n'explique pourtant pas tout. En effet, il abandonna non seulement son poste mais, peu de temps après, la recherche mathématique en général. S'il ne s'était agi que du financement de l'institut, il aurait pu trouver partout dans le monde des lieux d'activité n'allant pas à l'encontre de ses convictions morales.

De plus, il se sépara de sa femme Mireille Dufour et de leurs trois enfants, quitta Paris pour la campagne et se fixa – temporairement – de nouveaux objectifs. Il avait deux autres fils issus de ses nombreuses relations. Au fil des ans, ses rapports avec eux et leurs mères deviendront de plus en plus distants, tant et si bien qu'il ne les verra presque plus au cours de ses dernières décennies.

Inspiré par la révolution estudiantine de Mai 1968, par le mouvement écologiste alors naissant et le mouvement hippie américain, et en réaction à la guerre du Vietnam, Grothendieck fonda un groupe dénommé Survivre et militant pour la protection de l'environnement, opposé à toute forme de militarisme et en quête de nouvelles manières de vivre. Durant plus de deux ans, il en fut l'acteur principal et le chef de file financier.

Parallèlement, il fut professeur invité au Collège de France, à l'université Paris-Sud à Orsay, à Buffalo (États-Unis) et à Kingston (Canada), mais il était beaucoup moins engagé dans les mathématiques – ce qui signifie tout de même qu'il avait encore une activité supérieure à celle d'un professeur normal. De temps à autre, il faisait gagner à Survivre d'éminents alliés, mais le groupe ne prit jamais son envol et périclita lorsque Grothendieck, déçu, s'en détourna.

En 1973, Grothendieck s'installa successivement dans plusieurs petits villages du sud de la France. Il fut très marqué par un groupe de moines mendiants bouddhistes qui lui vinrent en aide de diverses façons. Il se lia aussi superficiellement avec des communautés de marginaux qui s'étaient installés à la campagne. Les membres de ces

Les documents de Grothendieck cachent-ils encore des découvertes ?

Alexandre Grothendieck a laissé après sa mort des dizaines de milliers de documents inexplorés : le fruit de ses méditations, sa correspondance retrouvée dans sa maison de Lasserre et des travaux mathématiques légués, en 1990, de son vivant, à l'un de ses anciens étudiants, Jean Malgoire, qui les a soigneusement conservés avant de les confier à l'université de Montpellier.

Jean Malgoire, dans quelles circonstances Alexandre Grothendieck vous a-t-il transmis ces archives qu'il aimait appeler ses « gribouillis » ?

Jean Malgoire : En juillet 1990, Alexandre Grothendieck m'appelle pour me demander si j'accepterais de venir récupérer sa bibliothèque mathématique, car il allait déménager et souhaitait profiter de l'occasion pour s'alléger. Heureux de mon accord, il me recommande surtout de venir avec un véhicule spacieux. Le lendemain, je le trouve assez excité, heureux de se projeter dans une nouvelle vie, avec des propos pleins de références mystiques. Il me propose, en plus de sa bibliothèque, d'emporter tous ses documents mathématiques (manuscrits, tapuscrits, nombreuses correspondances, prépublications...) et

m'aide à remplir la voiture. Il me montre aussi un grand bidon rempli de cendres où il a, dit-il, brûlé de nombreux papiers personnels. Il montrait, dans son élan mystique (j'ai quelques scrupules à parler de délire mystique), un parfait détachement pour ces documents et il me l'a précisé en me recommandant, je le cite : « Si tu souhaites un jour t'en débarrasser, ne les abandonne pas au bord d'une route, mais apporte-les dans un centre de recyclage... »

Je pensais alors qu'il souhaiterait probablement que je lui restitue tout ou partie de ces documents quand il serait sorti de cette période mystique. Mais il ne l'a pas fait. Et en 1995, je l'ai retrouvé pour l'informer de mon souhait de diffuser, avec son accord, la transcription (partielle) de l'un de ses manuscrits inédits :

La Longue marche à travers la théorie de Galois. Il a alors rédigé à mon intention un pouvoir qui allait beaucoup plus loin que ma demande, car il s'appliquait à tous les manuscrits donnés en 1990 (avec l'argument : « Tu n'auras pas à te [ou me ?] déranger chaque fois que tu souhaiterai diffuser un texte »). Il m'a aussi donné d'autres documents « oubliés en 1990 », dont le principal (en volume) était le manuscrit de *La théorie des dérivateurs* (2300 pages qui ont été depuis transcrites, éditées et diffusées).

Où en sont les travaux de numérisation et de déchiffrement ?

J. M. : Le nettoyage, le reconditionnement, l'inventaire détaillé des documents ainsi que leur numérisation sont terminés. Ce travail a été financé par la Région et l'université de Montpellier, et a été réalisé par les services de la bibliothèque interuniversitaire. Grâce à la connaissance que j'ai de ces documents, j'ai aidé à la réalisation de l'inventaire. La transcription n'était pas programmée dans cette première phase centrée sur la préservation et la conservation des documents.

Elle sera abordée dans un deuxième temps : cela prendra des années et l'aide de nombreux mathématiciens sera sollicitée.

Pensez-vous que ces archives recèlent des découvertes mathématiques déterminantes ?

J. M. : Parmi les manuscrits, deux tiers sont complètement inédits et attendus avec beaucoup d'intérêt par la communauté des mathématiciens. Rappelons que Grothendieck, s'il avait cessé de publier depuis le début des années 1970, n'avait pas arrêté pour autant de produire des mathématiques.

Qu'advient-il actuellement des dizaines de milliers de pages retrouvées dans sa maison ?

J. M. : Les plus de 60 000 pages retrouvées chez lui constituent le fonds dit de Lasserre que Grothendieck a légué par testament à la BNF en 1997. Celle-ci, à ma connaissance, a accepté le legs, et est en cours de négociation avec les héritiers pour régler les conditions financières et juridiques de ce legs.

– **Propos recueillis par Lydia Ben Ytzhak**

groupes le décrivaient comme un homme heureux, serviable et généreux, qui apportait des fruits et du vin aux repas communs et qui chantait beaucoup. Grothendieck lui-même raconta qu'il avait vécu cette période comme « un dimanche ».

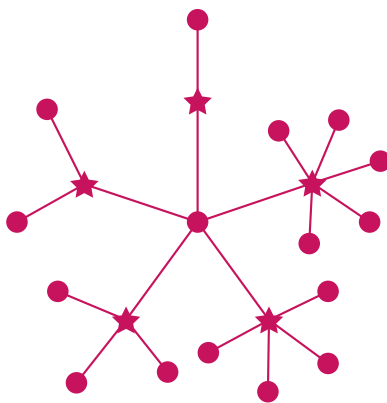
Au printemps 1973, il devint professeur à l'université de Montpellier. Dès lors, il ne voyagea plus pour des congrès ou des conférences et arrêta de publier. Ceux qui ont eu la chance d'assister à ses cours ont gardé le souvenir d'un enseignant à la passion communicative et d'une grande disponibilité.

Entre 1979 et 1990, et probablement plus tard encore, Grothendieck écrivit plusieurs « méditations » mathématiques, autobiographiques et philosophiques. La plus connue et la plus discutée est *Récoltes et semailles*, un texte de plus de 2000 pages contenant une sorte de règlement de compte avec le milieu mathématique. Le texte est pétri d'amertume, mais les opinions à son sujet divergent grandement : d'aucuns sont admiratifs devant le style poétique de certains passages et voient dans cette œuvre la marque d'un grand esprit au style unique. D'autres le trouvent ennuyeux et infiniment répétitif, mais aussi dérangeant, car Grothendieck y lance des accusations manifestement sans fondement contre ses anciens élèves et collègues.

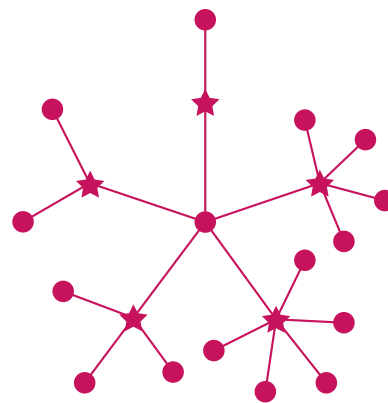
Délires et isolement

Parmi les textes mathématiques, Grothendieck écrivit *Esquisse d'un programme* alors qu'il postulait au CNRS (poste qu'il obtint en 1984) pour se libérer de sa charge d'enseignement, déçu par le peu d'intérêt des étudiants. Ce texte a inspiré de nombreux développements en mathématiques. Il contient notamment l'idée d'une géométrie non abélienne, c'est-à-dire non commutative. D'autres travaux concernent les fondements de la topologie (comme la *Topologie modérée* ou *La géométrie des formes*) ou l'algèbre homotopique (comme *Pursuing stacks* ou *La théorie des dérivateurs*) et sont, pour ceux déjà publiés, une source d'inspiration constante pour des mathématiciens de tout premier plan.

Vers la fin des années 1980, Grothendieck présente des symptômes de délire religieux. Il annonce le Jugement dernier pour le 14 octobre 1996 et proclame que Dieu l'a chargé d'en informer l'humanité ; il s'identifie à une nonne stigmatisée et considère son père adoptif comme la



LES « DESSINS D'ENFANTS »
tels ceux-ci, nommés fleurs de Leila, sont des graphes composés d'arêtes dont les nœuds alternent entre deux motifs (ici des étoiles et des disques). Grothendieck les évoque dans son *Esquisse d'un programme*.



réincarnation de Jésus – on pourrait facilement allonger cette liste.

Grothendieck disparut de la sphère publique en août 1991. Il acheta une vieille ferme à Lasserre, en Ariège. Il garda secret son lieu de résidence. Il refusait presque tous ses visiteurs, dont ses enfants. Selon ses propres dires, il s'occupait d'un travail philosophique sur le « Monde ». Pendant les vingt-trois dernières années de sa vie, il écrivit des dizaines de milliers de pages de « méditations ». Très occasionnellement, il demandait des livres à d'anciennes connaissances ou à la bibliothèque de l'IHES.

Pendant toutes ces années, Grothendieck n'aurait quitté son repaire qu'une seule fois, pour une raison tout aussi émouvante qu'absurde. Il pensait avoir fait du tort à un camarade d'école primaire, et voulait réparer cette faute. Comme il ne se souvenait plus du nom de cet élève et que sa venue à Hambourg n'était pas annoncée, le voyage fut totalement vain. En 2010, il fit à nouveau un coup d'éclat. Dans une lettre ouverte, il interdit la diffusion de ses écrits. Les projets de réédition de ses livres ou d'édition de ses œuvres complètes furent ainsi temporairement gelés.

Qu'en est-il aujourd'hui après le décès de Grothendieck en 2014 ? Il me semble important de rassembler et archiver tous ses écrits, scientifiques et autres (et en particulier sa très volumineuse correspondance). Son importance en tant que scientifique en fait un personnage d'intérêt public. Mais par-dessus tout, c'est un homme qui s'est rapproché des frontières de l'humanité, que ce soit intellectuellement, existentiellement, spirituellement ou moralement.

Le parcours et le destin exceptionnels d'Alexandre Grothendieck n'appartiennent pas qu'à lui-même, mais aussi et surtout à la société. C'est en cela que l'on reconnaît un homme vraiment extraordinaire. ■

■ À ÉCOUTER

Réécoutez l'émission de *France Culture* de Lydia Ben Ytzhak, **Alexandre Grothendieck ou le silence du génie**, avec Jean Malgoire, Pierre Cartier, Leila Schneps et d'autres invités.
http://bit.ly/PLS467_Grothendieck

■ BIBLIOGRAPHIE

Y. Pradeau, **Algèbre - Éléments de la vie d'Alexandre Grothendieck**, Allia, 2016.

W. Scharlau, **Who is Alexander Grothendieck ? Part 1 : Anarchy**, Books on Demand, 2011.

UN HÉRITAGE mathématique

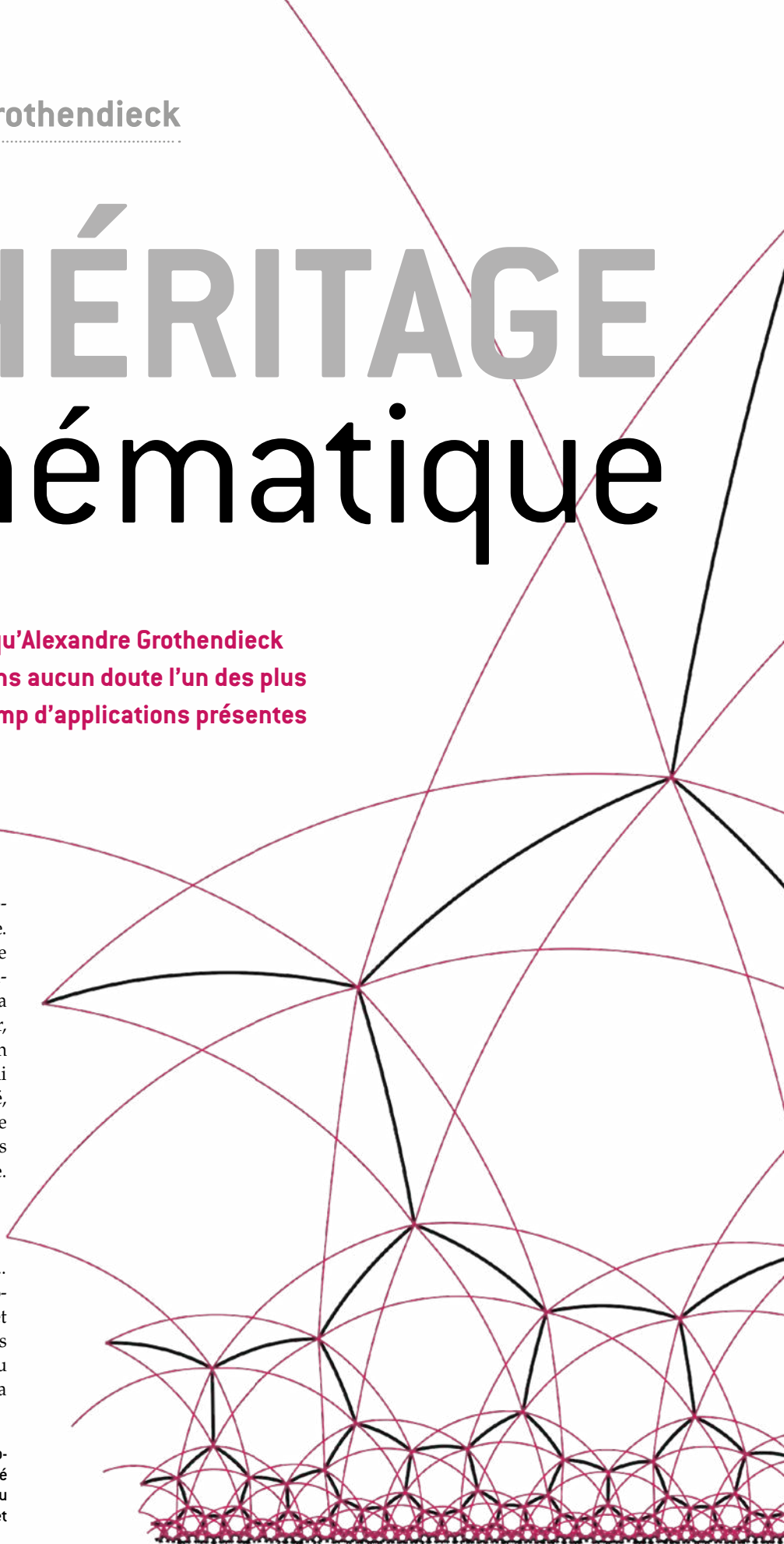
Jean Malgoire

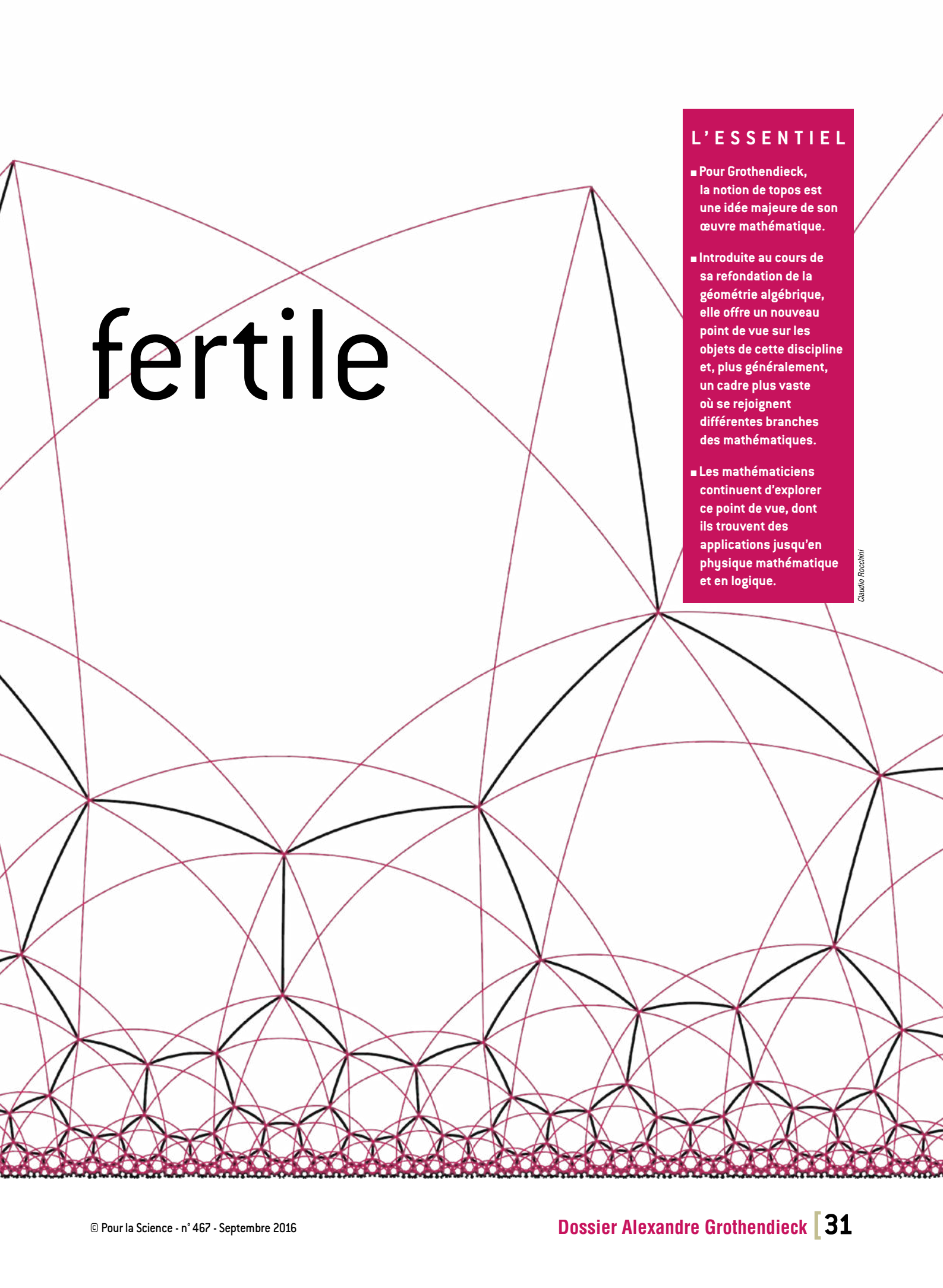
Parmi les multiples concepts qu'Alexandre Grothendieck a inventés, le « topos » est sans aucun doute l'un des plus puissants, et celui dont le champ d'applications présentes et à venir est le plus vaste.

Janvier 1985, une vague de froid exceptionnelle s'est abattue sur toute l'Europe. Dans sa très modeste mesure perdue au milieu des vignes, Alexandre Grothendieck est plongé depuis des mois dans la rédaction de *Récoltes et semailles*. Le 7 janvier, les rigueurs de l'hiver s'invitent dans son récit et celui-ci nous parle du vent glacé qui descend du mont Ventoux, du potager gelé, des souches de vigne qu'il coupe à la hache chaque jour pour alimenter le poêle auprès duquel il tape sur sa vieille machine à écrire. Mais rien n'entame son ardeur et ce qui devait être une introduction à un texte purement mathématique deviendra un ouvrage autonome de plus de 1500 pages...

Dans le premier fascicule sous-titré « Promenade à travers une œuvre – ou l'enfant et la mère », il parle avec passion des grands thèmes mathématiques qu'il a développés au cours de sa carrière et de la spécificité de sa

UN EXEMPLE DE TOPOS est représenté ici : le topos dit mixte constitué du demi-plan de Poincaré en géométrie hyperbolique et du groupe associé au pavage de type $\{7,3\}$, où chaque pavé a 7 côtés et où chaque sommet est relié à 3 arêtes (en noir).





fertile

L'ESSENTIEL

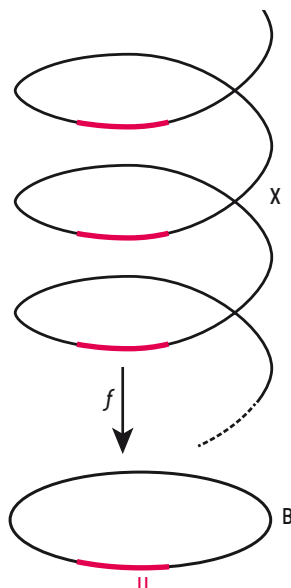
- Pour Grothendieck, la notion de topos est une idée majeure de son œuvre mathématique.
- Introduite au cours de sa refondation de la géométrie algébrique, elle offre un nouveau point de vue sur les objets de cette discipline et, plus généralement, un cadre plus vaste où se rejoignent différentes branches des mathématiques.
- Les mathématiciens continuent d'explorer ce point de vue, dont ils trouvent des applications jusqu'en physique mathématique et en logique.

Claudio Rocchini

UN REVÊTEMENT ÉTALE DU CERCLE

Un revêtement étale d'un espace topologique B est un espace (X, f) au-dessus de B (c'est-à-dire un espace X muni d'une application f continue de X dans B) qui vérifie la propriété suivante: il existe un recouvrement de B par des ouverts U (c'est-à-dire une famille d'ouverts U de B dont la réunion donne B) tels que, pour tout U , la partie de X au-dessus de U est une réunion de copies de U . On dit qu'un tel U trivialise le revêtement.

Par exemple, l'enroulement de la droite réelle sur le cercle est un revêtement étale. Dans cet exemple, B est un cercle, X la droite réelle et f « l'enroulement de corde sur la poulie définie par le cercle », représenté comme une projection verticale (voir la figure ci-contre, où un ouvert U a été représenté). La notion de revêtement est fondamentale en topologie et la classification des revêtements d'un espace donné est souvent un des premiers chapitres des traités de topologie algébrique.



démarche; et cela dans un langage « non technique », accessible à des lecteurs non mathématiciens auxquels il s'adresse individuellement: « [...] aussi si tu "accroches" à ce que je vois à dire sur mon œuvre (et sûrement alors quelque chose de l'image en moi "passera" bel et bien), tu pourras te flatter d'avoir mieux saisi ce qui fait l'essentiel dans mon œuvre, qu'aucun peut-être de mes savants collègues ». Peut-on rêver meilleur guide?

Au fil de sa promenade, Grothendieck cite une liste des douze idées maîtresses de son œuvre mathématique. Parmi ces thèmes, explique-t-il, certains sont à l'état embryonnaire, d'autres sont encore dans leur enfance, mais la moitié ont atteint une telle maturité que « parmi la gent géomètre surtout, "tout le monde" de nos jours les entonne sans même plus le savoir (comme Monsieur Jourdain faisait de la prose), à longueur de journée et à tout moment ». La notion de topos est l'un de ces thèmes, et pas n'importe lequel. Pour Grothendieck, il s'agit de l'idée majeure de son œuvre, la plus vaste par sa portée:

Le thème du topos [...] est ce « lit », ou cette « rivière profonde », où viennent s'épouser la géométrie et l'algèbre, la topologie et l'arithmétique, la logique mathématique et la théorie des catégories, le monde du continu et celui des

structures « discontinues » ou « discrètes » [...]. Il est ce que j'ai conçu de plus vaste, pour saisir avec finesse, par un même langage riche en résonances géométriques, une « essence » commune à des situations les plus éloignées les unes des autres, provenant de telle région ou de telle autre du vaste univers des choses mathématiques.

C'est aussi une porte d'entrée vertigineuse dans la pensée mathématique de Grothendieck.

En 1958, le mathématicien, devenu célèbre après avoir démontré une généralisation du théorème de Riemann-Roch (voir l'article de Winfried Scharlau, pages 22 à 29), pose les bases d'une géométrie nouvelle en introduisant la notion de schéma. À l'époque, la géométrie algébrique est divisée en plusieurs domaines aux interactions limitées: des domaines où les objets sont perçus comme continus (géométrie analytique, géométrie algébrique classique sur le corps des nombres réels ou le corps des nombres complexes) et d'autres où ils sont discontinus (géométrie arithmétique sur les corps finis, par exemple).

Les schémas fournissent une autre façon, généralisée, de voir les objets de la géométrie algébrique, c'est-à-dire les variétés algébriques – par exemple des surfaces définies par une équation polynomiale telle

$x^2 + y^2 + z^2 = 1$ (équation d'une sphère); cette vision permet d'englober même les structures discontinues – discrètes – de la géométrie arithmétique (voir l'article de Winfried Scharlau).

Pour Grothendieck, les schémas constituent ainsi « le cœur » de la nouvelle géométrie, l'outil qui unifie les géométries algébrique et arithmétique. Mais ce sont les topos, notion introduite en 1963, qui forment « la demeure » de la nouvelle géométrie. Les topos sont une métamorphose de la notion d'espace. Ils permettent d'appliquer une vision topologique subtile aux objets de la géométrie algébrique (les variétés ou leur généralisation, les schémas). Les schémas et les topos créent en quelque sorte un pont entre le discret et le continu.

Dans l'histoire du concept mathématique d'espace, les topos constituent un dépaysement soudain, explique Grothendieck:

La notion d'« espace » est sans doute une des plus anciennes en mathématique. Elle est si fondamentale dans notre appréhension « géométrique » du monde, qu'elle est restée plus ou moins tacite pendant plus de deux millénaires. [...] Jusqu'à l'apparition du point de vue des topos, vers la fin des années cinquante, l'évolution de la notion d'espace m'apparaît comme une évolution essentiellement « continue ». [...] Certes, des changements profonds ont eu lieu dans la façon dont le mathématicien ou le « philosophe de la nature » concevait « l'espace ». Mais ces changements me semblent tous dans la nature d'une « continuité » essentielle – ils n'ont jamais placé le mathématicien, attaché (comme tout un chacun) aux images mentales familières, devant un dépaysement soudain.

Et pourtant, les précédentes évolutions de la notion d'espace offraient déjà des changements conceptuels considérables.

Les métamorphoses de la notion d'espace

D'abord au XVII^e siècle, grâce à René Descartes et son invention des coordonnées cartésiennes, les figures géométriques se sont métamorphosées en équations: le cercle réapparaît sous la forme « $x^2 + y^2 = 1$ ». La représentation de l'espace au moyen des nombres est une transformation que l'on peut qualifier de radicale (et qui continue de dérouter les étudiants...).

Puis au XIX^e siècle, le mathématicien allemand Bernhard Riemann introduit la notion de variété abstraite, un espace qui

peut être décrit localement par une, deux trois ou même n coordonnées (espace à n dimensions). Avec Riemann, les variétés se dégagent des espaces ambiants dans lesquels elles sont plongées et prennent leur autonomie : il n'y a plus *a priori* d'extérieur naturel à une variété. Cela a permis par exemple à Einstein de concevoir l'Univers comme une variété qui ne soit pas *a priori* un espace euclidien (dont les lois sont celles de la géométrie traditionnelle d'Euclide). Le progrès est réel, mais la disparition du décor demande un certain effort d'abstraction.

Au début du XX^e siècle, les mathématiciens s'aperçoivent que dans les espaces métriques (c'est-à-dire munis d'une notion de distance entre les points), beaucoup de propriétés fondamentales (telle la connexité, qui est la propriété d'un espace d'être « d'un seul tenant », ou la « compacité ») ne dépendent pas de la métrique qu'ils portent, mais seulement des parties dites ouvertes de ces espaces. Une partie est dite ouverte si, dès qu'elle contient un point, elle contient une boule centrée en ce point. Par exemple, les ouverts de la droite réelle sont les réunions (quelconques) d'intervalles ouverts, et les ouverts du plan les réunions de disques ouverts, c'est-à-dire privés de leurs bords. De plus, les ouverts ont des propriétés intéressantes qui leur confèrent

une certaine stabilité : une réunion quelconque d'ouverts ou une intersection d'un nombre fini d'ouverts est encore un ouvert.

En 1914, le mathématicien allemand Felix Hausdorff s'appuie sur ces propriétés de stabilité pour définir la notion d'espace topologique : un espace topologique est un ensemble E muni d'un ensemble de parties de E appelées ouverts (ou parties ouvertes de E) vérifiant les deux propriétés suivantes : l'ensemble E lui-même et l'ensemble vide sont des ouverts, et une réunion quelconque d'ouverts ou une intersection d'un nombre fini d'ouverts est encore ouverte. On dit que l'ensemble des ouverts de E est une topologie sur E . Des concepts antérieurs (comme ceux de variété ou d'espace métrique), la définition d'espace par Hausdorff ne conserve qu'une idée très affaiblie de proximité à travers le concept d'ouvert.

La notion d'espace topologique permet d'appliquer notre intuition « spatiale » à des situations sans métrique naturelle. Par exemple, en géométrie algébrique, grâce à Oscar Zariski, mathématicien d'origine russe de la génération précédant celle de Grothendieck, on sait associer à tout anneau A (c'est-à-dire à tout ensemble muni d'une addition et d'une multiplication, par exemple l'anneau $\mathbb{Z}$ des entiers relatifs ou les anneaux de polynômes) un espace

■ L'AUTEUR



Jean MALGOIRE, ancien élève de Grothendieck, est maître de conférences à l'université de Montpellier.

Les premiers pas de la nouvelle géométrie

Avant les réflexions de Grothendieck et de son école, les objets de base de la géométrie algébrique étaient les anneaux de polynômes (à coefficients réels ou complexes) dont les éléments s'interprètent de manière assez évidente comme des fonctions à valeurs dans $\mathbb{R}$ ou $\mathbb{C}$.

Grothendieck a voulu étendre à tous les anneaux (commutatifs) le champ de la géométrie algébrique. Pour cela, il fallait pouvoir, par analogie avec les anneaux de polynômes, considérer les éléments d'un anneau A quelconque comme des fonctions. C'était faisable, mais avec un certain prix à payer, comme le montre le cas de l'anneau $\mathbb{Z}$ des entiers relatifs.

Pour considérer tout entier n de $\mathbb{Z}$ comme une fonction, il

suffit d'associer à n une fonction définie sur le spectre de $\mathbb{Z}$ (l'ensemble des nombres premiers) par sa valeur en chaque nombre premier p . On pose cette valeur égale au résidu modulo p de n dans le corps fini $\mathbb{Z}/p\mathbb{Z}$, c'est-à-dire au reste de la division euclidienne de n par p . Le prix à payer est une différence essentielle avec le cas des anneaux de polynômes, car pour $\mathbb{Z}$, la fonction associée à n ne prend pas ses valeurs sur un corps unique comme $\mathbb{R}$ ou $\mathbb{C}$, mais sur un

corps différent ($\mathbb{Z}/p\mathbb{Z}$) pour chaque nombre premier p . Toute la difficulté consistait donc à rassembler de manière cohérente tous ces corps. Et bien sûr à faire de même pour chaque anneau (commutatif avec élément unité). C'est le formalisme des faisceaux (voir l'encadré page 34) qui a donné la solution à Grothendieck et qui l'a conduit au langage des schémas.

La notion de faisceau avait été introduite quelques années plus tôt, en 1946, par le mathématicien français Jean Leray. Prisonnier de guerre en Autriche, Leray participait à une université de captivité et, de peur d'être réquisitionné pour travailler à l'effort de guerre

allemand, il avait délaissé sa spécialité, l'hydrodynamique, plus proche d'applications potentielles, pour y donner un cours de topologie algébrique. Dans ce cours, il avait notamment cherché à reconstruire la topologie algébrique en se débarrassant des hypothèses inutiles. Dans la continuité de ses recherches, il avait conçu une première notion de faisceau sur un espace topologique, un outil qui lui permettait de relier entre elles des données locales pour en faire une donnée globale. Jean-Pierre Serre a étendu ces méthodes à la géométrie algébrique, où Grothendieck les a utilisées et considérablement développées à son tour.

topologique $\text{Spec } A$ appelé spectre de A . L'espace $\text{Spec } A$ n'a pas de métrique naturelle (c'est-à-dire de fonction définissant une distance entre les éléments de $\text{Spec } A$) qui donnerait les ouverts de $\text{Spec } A$. Pourtant, la topologie de Zariski qui définit $\text{Spec } A$ en fait bien un espace topologique : pour $\mathbb{Z}$, par exemple, ce spectre est l'ensemble des nombres premiers auquel on adjoint 0, et ses ouverts sont la partie vide et les complémentaires des ensembles formés d'un nombre fini de nombres premiers. Pour un anneau quelconque, le spectre est l'ensemble des « idéaux premiers » (qui sont une généralisation des nombres premiers).

Avec le concept d'espace topologique, les mathématiciens ont vraiment l'impression d'avoir atteint un degré de généralité maximal, en quelque sorte indépassable. De fait, grâce à sa souplesse et à sa simplicité,

le concept connaît un grand succès et continue d'être le cadre naturel de la topologie générale. Aussi, si les limitations de cette notion d'espace sont apparues assez naturellement à Grothendieck à la fin des années 1950, il a fallu faire un effort conceptuel considérable pour imaginer comment les dépasser.

Un manque cruel d'ouverts

Pour Grothendieck, les limitations se font particulièrement sentir dans le cadre de la topologie (l'ensemble d'ouverts) que Zariski a définie, par extension, pour les variétés algébriques, car si elle est suffisante pour beaucoup de propos, elle « manque cruellement d'ouverts » : par exemple sur une courbe algébrique sur $\mathbb{C}$, les seuls

ouverts non vides pour la topologie de Zariski sont les complémentaires des parties finies de la courbe. Si l'on prend comme courbe la droite affine sur $\mathbb{C}$ (c'est-à-dire le spectre de l'anneau des polynômes à une variable et à coefficients dans $\mathbb{C}$), on trouve l'ensemble $\mathbb{C}$ des nombres complexes, et ses ouverts pour la topologie de Zariski sont la partie vide et les complémentaires des parties finies de $\mathbb{C}$, c'est-à-dire le plan privé d'un nombre fini de points. Tous les ouverts (à part le vide) sont donc très gros : on ne peut pas avoir de « petits » voisinages d'un point. En revanche, pour la topologie ordinaire sur le plan complexe, les ouverts sont les réunions quelconques de disques ouverts ; il y a donc beaucoup plus d'ouverts ! Par exemple, autour de chaque point, on peut prendre pour voisinages du point des disques ouverts de rayons aussi petits que l'on souhaite. Ainsi, des espaces X au-dessus d'une variété complexe – c'est-à-dire munis d'une application continue de X vers la variété – peuvent être localement très simples pour la topologie ordinaire sans l'être pour la topologie de Zariski.

Pour pallier cette difficulté, Grothendieck élargit la notion de topologie sur une variété en étendant celle des ouverts à prendre en compte. Il ne se limite plus aux parties ouvertes de la variété, mais accepte aussi certains espaces au-dessus des ouverts, appelés revêtements étales d'ouverts (voir l'encadré page 32).

Cette notion remonte en quelque sorte à Riemann et aux surfaces qu'il inventa au XIX^e siècle pour faciliter l'étude des fonctions multiformes, c'est-à-dire des fonctions mal définies parce qu'elles associent plusieurs valeurs à une même valeur de la variable. Puisque les fonctions donnaient plusieurs valeurs en un même point de l'espace de départ, Riemann a transformé l'espace de départ en feuillets superposés et recollés de telle façon que sur la nouvelle surface constituée – appelée depuis surface de Riemann –, la fonction n'associe plus qu'une seule valeur à chaque valeur de la variable.

D'après Luc Illusie, ancien élève de Grothendieck, l'idée de la localisation étale chez son maître remonte à avril 1958, à l'occasion d'un exposé de Jean-Pierre Serre au séminaire Chevalley. Jean-Pierre Serre avait remarqué qu'élargir la localisation d'un espace au-dessus d'une variété algébrique à des revêtements étales d'ouverts permettait de révéler certaines de ses propriétés. Enthousiaste, Grothendieck

La notion de faisceau

Un faisceau sur un espace topologique B n'est rien d'autre qu'un espace étalé sur B , une notion qui s'apparente à celle de revêtement étale (voir l'encadré page 32), mais qui est plus faible.

Un espace étalé sur B est un espace (E, p) au-dessus de B où p est une application qui a la propriété d'être un homéomorphisme local : autour de chaque point x de E , il existe un ouvert U de E le contenant tel que U soit une copie de son image $V = p(U)$ dans B .

Par exemple, les revêtements étales sont des espaces étalés, mais la réciproque est fautive : l'inclusion de l'intervalle ouvert $]0, 1[$ dans la droite réelle $\mathbb{R}$ fait de lui un espace étalé sur $\mathbb{R}$, mais ce n'est pas un revêtement de $\mathbb{R}$ (il y a un problème au-dessus de 0 et 1...).

En quelque sorte, pour un revêtement étale, on demande d'être très simple « localement en bas »,

c'est-à-dire sur B , et pour un espace étalé, on demande d'être très simple « localement en haut », c'est-à-dire sur E , ce qui est une condition plus faible.

À un tel espace étalé (E, p) sur B , associons un foncteur F_E défini sur l'ensemble des ouverts de B (c'est une catégorie) et à valeurs dans la catégorie des ensembles. Formellement, cela signifie qu'à tout ouvert U de B , on associe l'ensemble $F_E(U)$ des fonctions continues de U dans E qui, composées avec p , donnent l'identité de U . Alors pour U et V deux ouverts quelconques de B tels que V est inclus dans U , on a une application dite de restriction de $F_E(U)$ dans $F_E(V)$ qui, à chaque fonction sur U , associe sa restriction sur V .

On vérifie facilement que E peut être reconstitué à partir de F_E . On vérifie aussi la propriété fondamentale suivante sur F_E , dite propriété de recollement : si (U_i) est un recouvrement d'un ouvert U

de B (c'est-à-dire une famille d'ouverts U_i dont la réunion donne U) et si on s'est donné pour chaque i un élément s_i de $F_E(U_i)$ tel que les s_i soient compatibles deux à deux (pour tout i et j , les restrictions de s_i et de s_j sur l'intersection de U_i et U_j coïncident, alors il existe un et un seul élément s dans $F_E(U)$ dont les restrictions à chaque U_i sont précisément les s_i .

En résumé, des données « locales » compatibles (les s_i) permettent de définir une donnée « globale » unique (s) dans $F_E(U)$.

On part de cette définition de foncteur associé à un espace étalé pour définir la notion générale de faisceau sur un espace topologique B : un faisceau sur B est un foncteur sur la catégorie des ouverts de B vérifiant la propriété de recollement.

Cette propriété est ce qui permet de construire des objets globaux à partir de données locales – un outil d'une grande utilité en géométrie algébrique.

a repris l'idée pour élargir la topologie de Zariski. Il voyait même déjà comment cet élargissement aiderait à s'attaquer aux conjectures de Weil.

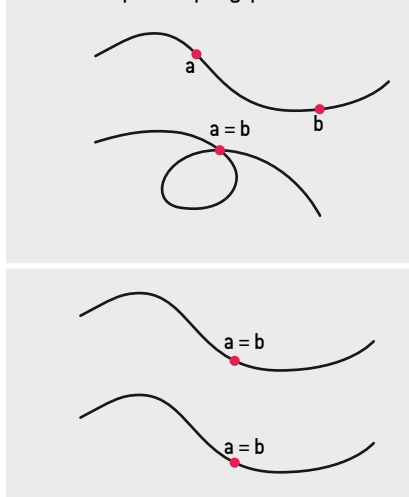
Depuis leur formulation, en 1949, par André Weil, un des membres fondateurs du groupe de mathématiciens Bourbaki (que Grothendieck a rejoint au début des années 1950), ces conjectures font miroiter l'idée que des relations existent entre des informations de nature arithmétique et la topologie. Weil les a énoncées alors qu'il menait des calculs sur le nombre de solutions de certaines équations algébriques dans des ensembles finis de nombres. En substance, les conjectures de Weil relient le nombre de certaines solutions d'une équation algébrique à des propriétés topologiques de la variété algébrique décrite par l'équation. Cette relation entre informations arithmétiques et topologie suggérait de construire une théorie plus subtile – une théorie cohomologique – qui permettrait d'englober les propriétés arithmétiques et topologiques de la variété. Grothendieck construira une telle théorie quelques années plus tard (la cohomologie étale) et prouvera une partie des conjectures; la dernière sera démontrée en 1974 par son élève Pierre Deligne et lui vaudra une médaille Fields.

La genèse des topos

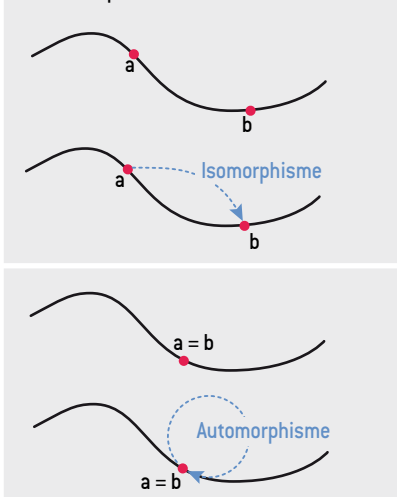
Cependant, en 1958, pris par le considérable travail de refondation de la géométrie algébrique qu'il a entrepris, Grothendieck ne développe pas tout de suite ses idées sur la localisation étale. Tout est dans sa tête, mais il n'y revient que quelques années plus tard, en 1963, avec le démarrage du séminaire de géométrie algébrique du Bois Marie n° 4 (SGA4) à l'Institut des hautes études scientifiques (IHES), à Bures-sur-Yvette, consacré... à sa nouvelle géométrie. Grothendieck donne alors un cadre mathématique formel à l'idée de localisation étale. Les deux principaux outils qu'il utilise pour cela sont le langage des catégories et la théorie des faisceaux.

La notion de catégorie a été introduite en 1945 par les Américains Samuel Eilenberg et Saunders Mac Lane. Elle formalise la notion de classe d'objets, c'est-à-dire d'objets de même nature, et de relations entre ces objets. Une catégorie est d'abord un graphe orienté – des objets et des flèches entre ces objets, qu'on appelle morphismes. Mais on a en plus une composition des

Dans les espaces topologiques



Dans les topos



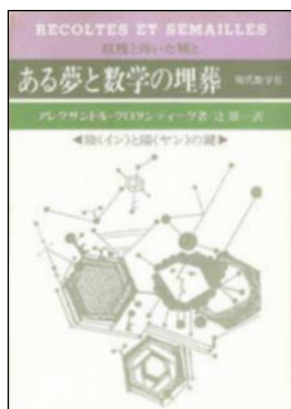
LES TOPOS FONT DISPARAÎTRE LES CAS PARTICULIERS. Par exemple, pour identifier deux points a et b d'un segment dans le cadre classique des espaces topologiques, on fait une boucle avec le segment pour faire coïncider a et b , sauf dans le cas particulier où a et b sont confondus. Dans ce cas particulier, rien ne se passe. En revanche, dans le cadre des topos, pour identifier deux points sur un segment, on les recolle au moyen d'un isomorphisme, qui relie les points a et b . Et si a et b sont confondus, l'isomorphisme existe toujours, c'est un automorphisme du point; et on a encore une sorte de « boucle infinitésimale »...

flèches généralisant la composition des applications entre ensembles.

Parmi les catégories les plus usitées, citons la catégorie des ensembles (les flèches sont alors les applications entre ensembles), ou celles des groupes, des anneaux, des espaces topologiques, etc. De même, si E est un espace topologique muni d'un ensemble $\text{Ouv}(E)$ d'ouverts, alors $\text{Ouv}(E)$ est, de manière naturelle, une catégorie (avec pour tout couple d'ouverts U et V tels que V inclus dans U , un seul et unique morphisme de V vers U : l'application inclusion de V dans U).

La « philosophie » des catégories est de mettre l'accent sur les morphismes plutôt que sur les objets eux-mêmes: deux objets isomorphes dans une catégorie sont, du point de vue catégorique, « interchangeables ». Et un objet est connu si l'on connaît ses relations à tous les autres objets. Ce résultat élémentaire, mais fondamental, porte le nom de lemme de Yoneda et peut se traduire par: « Dis-moi qui tu fréquentes et je te dirai qui tu es. »

Bien évidemment, les mathématiciens s'intéressent aussi aux relations entre catégories. Celles-ci sont formalisées sous la forme de foncteurs, des analogues des applications entre ensembles qui permettent de transporter des objets et les relations entre eux d'un « cadre » (une catégorie) dans un autre (une autre catégorie).



Jean-Marc Mery

RÉCOLTES ET SEMAILLES, où Grothendieck revient notamment sur son œuvre mathématique, n'a pour l'heure été publié qu'au Japon.

L'autre outil clé que Grothendieck utilise est le concept de faisceau, introduite en 1946 par le mathématicien français Jean Leray. En substance, un faisceau sur un espace topologique est un foncteur qui a la propriété de relier entre elles des données locales pour en faire une donnée globale (voir l'encadré page 34).

Grothendieck remarque que la notion centrale qui permet de définir ce qu'est un faisceau sur un espace topologique B est simplement la notion de recouvrement d'un ouvert par une famille d'ouverts. Si l'on veut élargir la notion d'ouvert à des objets au dessus de B (par exemple à des revêtements d'ouverts pour la localisation étale), en d'autres termes, si l'on veut formaliser la notion d'ouvert pour pouvoir considérer les revêtements étales d'ouverts comme des ouverts, il faut élargir la notion de recouvrement à d'autres objets que les ouverts ordinaires.

En remarquant aussi que les ouverts d'un espace forment une catégorie, Grothendieck fait le saut de remplacer la catégorie des ouverts d'un espace par une catégorie quelconque C, munie pour tout objet d'une notion de recouvrement : c'est la donnée pour tout objet x de C de familles d'objets de C au-dessus de x, appelées familles couvrantes (de x). Grothendieck nomme site cette notion de catégorie munie de familles couvrantes, et l'ensemble des familles couvrantes constitue une topologie dite depuis de Grothendieck. La notion de faisceau sur un site C est alors absolument analogue à celle de faisceau sur un espace topologique : c'est un foncteur de la catégorie C dans celle des ensembles, qui vérifie la propriété du « passage du local au global » pour tout objet de C et toute famille couvrante de cet objet.

Grothendieck aurait pu s'arrêter là pour les besoins de la géométrie algébrique. Plusieurs sites ont été définis, dont le site dit étale qui a conduit à la cohomologie étale, grâce à laquelle les conjectures de Weil ont été démontrées. Le site étale et les faisceaux pour la topologie associée, la topologie étale, sont les objets qui ont cristallisé l'idée initiale de Grothendieck de la localisation étale. Mais il voit toujours plus loin. Pour lui, l'objet le plus intéressant, intrinsèque, associé à un site est la catégorie de tous les faisceaux sur la catégorie du site. C'est cette catégorie des faisceaux qu'il nomme topos.

Plus généralement, pour Grothendieck, un topos est une catégorie équivalente

à la catégorie des faisceaux sur un site. Cette nouvelle notion d'espace a deux propriétés importantes, explique-t-il dans *Récoltes et semailles* :

Primo, la nouvelle notion n'est pas trop vaste, car dans les [topos], les intuitions et les constructions « géométriques » les plus essentielles, familières pour les bons vieux espaces d'antan, peuvent se transposer de façon plus ou moins évidente. Et secundo, la nouvelle notion est en même temps assez vaste pour englober une foule de situations qui, jusque-là, n'étaient pas considérées comme donnant lieu à des intuitions de nature « topologico-géométrique ».

À chaque espace topologique X est associé un topos – la catégorie des faisceaux sur X. Cette correspondance est un foncteur. C'est ce foncteur, cette « traduction » que Grothendieck appelle « traversée du miroir » :

Comme si souvent en mathématique, nous avons réussi ici (grâce à l'idée cruciale de « faisceau ») à exprimer une certaine notion (celle

d'« espace » en l'occurrence) en termes d'une autre (celle de « catégorie »). [...] Mais ici, il y a plus. [...] Il se trouve que de l'autre côté du miroir, ces « catégories » sur lesquelles on tombe, en partant d'espaces topologiques, sont de nature très particulière. Elles jouissent en effet d'un ensemble de propriétés fortement typées, qui les font s'apparenter à des sortes de « pastiches » de la plus simple imaginable d'entre elles – celle qu'on obtient en partant d'un espace réduit à un seul point.

Cette catégorie est précisément la catégorie des ensembles, car un faisceau sur un espace réduit à un point est un ensemble. Donc la catégorie des faisceaux sur un point est la catégorie des ensembles ! Ce qui a, sans doute, de quoi dépayser quelque peu : l'espace le plus réduit, le point, comme topos, est représenté par quelque chose d'aussi énorme que la catégorie des ensembles (que dans ce cadre on appelle plutôt topos ponctuel ou topos final). Ainsi, les topos sont des catégories

LE PARADOXE DE BANACH-TARSKI

Le point de vue des topos éclaire d'un jour nouveau un célèbre « paradoxe », le « paradoxe de Banach-Tarski », et le fait même disparaître. Le théorème de Banach-Tarski entraîne l'existence d'une partition « paradoxale » de toute boule de rayon égal à 1 en quatre « pièces de Lego » identiques qui, prises deux à deux, permettent de reconstituer deux boules de rayon 1. Ces quatre pièces sont impossibles à dessiner, car on sait

seulement, par le théorème, qu'elles existent. Elle ne sont pas non plus mesurables, c'est-à-dire qu'on ne peut pas leur attribuer de volume, car sinon, en additionnant leurs volumes, on aboutirait à une contradiction du type $1 = 1 + 1...$ Et pourtant, ces pièces de Lego existent, dit le théorème.

En fait, le paradoxe s'évanouit dans le cadre des topos, comme l'a montré Olivier Leroy en 1995. La partition

ensembliste « paradoxale » n'est en effet plus une partition du point de vue toposique, car dans le cadre des topos, les pièces de Lego ne sont plus disjointes deux à deux : il existe des intersections de nature purement toposique (en fait, elles n'ont pas de points) qui rendent mesurables tous les sous-topos de la boule et lèvent la contradiction. La vision classique ne les voit pas, il faut chausser de nouvelles lunettes pour les déceler...

Dans les espaces topologiques



Dans les topos



qui présentent « beaucoup de propriétés » de la catégorie des ensembles.

Pour Grothendieck, de l'autre côté du miroir entre les espaces ordinaires et les topos, du côté des topos, « le monde est plus beau ». Pour m'en donner une illustration, Olivier Leroy, un ancien élève de Grothendieck, m'avait expliqué il y a bien longtemps : « Passer des espaces topologiques aux topos, c'est comme passer de la géométrie affine à la géométrie projective : cela fait disparaître les cas particuliers. » (voir la figure page 35 et l'encadré page 36).

Plus généralement, le langage des topos permet de donner une représentation spatiale pertinente à des situations qui, classiquement, n'étaient pas associées à une telle représentation (principalement en algèbre). Par exemple, la théorie de Galois, qui portait originellement sur la résolubilité des équations algébriques, devient, dans le cadre des topos, un exemple de situation galoisienne que l'on rencontre dans beaucoup de domaines, comme la classification des revêtements d'un espace topologique.

Le langage des topos est devenu un outil fondamental pour un grand pan de la géométrie algébrique actuelle, notamment la géométrie algébrique dérivée. Continuation de la géométrie algébrique dans l'esprit de Grothendieck, cette géométrie est développée par des mathématiciens comme Jacob Lurie et Bertrand Toën en France. Ces mathématiciens ont même dépassé les « simples » topos et utilisent des notions de topos d'ordres supérieurs (les infini-topos, par exemple).

Certains essayent aussi de mieux comprendre les « espaces de modules », c'est-à-dire les espaces décrivant toutes les formes possibles d'objets d'un type géométrique donné, comme les courbes algébriques. Dans les années 1980, l'étude de l'espace algébrique de toutes les formes possibles de courbes, qui est en fait un topos et non un espace ordinaire, a été centrale dans le travail de Grothendieck.

Les applications de la théorie des topos vont aussi bien au-delà de la géométrie algébrique. Les physiciens théoriciens y voient un cadre naturel pour une logique quantique. Les logiciens, quant à eux, les utilisent pour construire des modèles de théories formelles : on peut voir chaque topos comme une sorte d'univers des ensembles avec sa propre logique. Comme application, on a pu construire un topos dans lequel l'hypothèse du continu n'est

pas vérifiée. Formulée au XIX^e siècle par le mathématicien allemand Georg Cantor, cette hypothèse affirme que si un ensemble présente un nombre d'éléments d'une infinité d'ordre supérieur à celle de l'ensemble des nombres naturels, alors il a au moins autant d'éléments que l'ensemble des nombres réels. La démonstration de cette hypothèse est le premier des 23 problèmes que le mathématicien allemand David Hilbert avait proposés en 1900 pour guider la recherche en mathématiques. En 1963, le mathématicien américain Paul Cohen avait montré que l'hypothèse ne peut se déduire des axiomes de la théorie des ensembles, ce qui lui avait valu la médaille Fields. La théorie des topos a permis de retrouver ce résultat de manière plutôt simple.

Nul besoin de points pour exister

Contrairement aux points des espaces topologiques, ceux des topos ne font pas partie de la structure, mais ils ne disparaissent pas forcément : un point d'un topos T est un morphisme du topos ponctuel (la catégorie des ensembles) dans T . Un topos non vide n'a donc pas forcément de point. En revanche, dans un topos, il peut y avoir des morphismes entre les points, comme dans la situation décrite dans la figure page 35.

D'une certaine manière, le théorème de Banach-Tarski (voir l'encadré page 36), si difficile à accepter dans le cadre classique et qui s'éclaire dans celui des topos, nous montre une certaine limite du choix qui prévaut depuis au moins Descartes, et qui consiste à modéliser (et même à penser !) l'espace comme un ensemble de points. Postulat d'ailleurs conforté par le point de vue ensembliste en vigueur depuis Cantor et Hilbert : dans les mathématiques « modernes », tous les objets sont des ensembles !

Le cadre des topos nous permet de sortir de ce carcan, car les topos n'ont pas besoin de points pour exister : il donne au mathématicien – comme s'il avait chaussé de nouvelles lunettes – un nouvel outil d'exploration, plus fin, faisant apparaître de nouveaux objets et apportant de nouvelles réponses à d'anciennes questions. ■

De l'autre côté du miroir

entre les espaces ordinaires et les topos, le monde est plus beau

■ BIBLIOGRAPHIE

Le site du Grothendieck Circle rassemble certaines œuvres inédites du mathématicien : www.grothendieckcircle.org/

UN ÉCRIVAIN en quête de vérité

Alexandre Grothendieck a laissé bien plus qu'une œuvre mathématique monumentale : une façon d'aborder le monde sans fard ni artifices, à commencer par ceux dont on se pare soi-même pour affronter la vie.

Leila Schneps

Si Alexandre Grothendieck n'avait pas été un grand mathématicien, nous n'aurions jamais connu l'écrivain prolifique qu'il fut, en particulier à partir des années 1970. Ses œuvres écrites, éparpillées, difficiles à déchiffrer, partiellement perdues, seraient restées au fond des malles où elles ont été consignées après sa mort. Du moins celles que Grothendieck n'a pas brûlées et qu'il conservait, à partir de sa disparition en 1991 (son retrait du monde pour le village de Lasserre, en Ariège), dans d'immenses classeurs sur les rayons de sa chambre à coucher. Aujourd'hui, les traits de cette figure mystérieuse pleine d'inspiration et de violentes contradictions, qui commençaient tout juste à émerger grâce aux quelques biographies parues depuis sa mort se précisent à la lecture des trésors de Lasserre. Et si c'est grâce au mathématicien que l'on découvre les œuvres littéraires de Grothendieck, celles-ci pourraient bien rester, être lues et appréciées pour elles-mêmes. Par sa constante quête de vérité et les multiples efforts déployés pour transmettre, au fil

L'ESSENTIEL

■ **Toute sa vie, Alexandre Grothendieck a écrit, consignait ses réflexions mathématiques, mais aussi ses pensées sur lui, les hommes et la société.**

■ **L'amour, les rêves, le mal... Les thèmes qu'il a abordés au fil de ses milliers de pages sont nombreux, mais une constante demeure : la volonté de voir le monde sans déformation.**

■ **Pour l'authenticité et la constance de sa démarche, il mérite d'être lu.**

© Shutterstock.com/DIARG

du chemin, ses découvertes, Grothendieck mérite de rejoindre les monuments de la pensée française.

Toute sa vie, Grothendieck a écrit au fil de la plume, le plus souvent la nuit, une petite lampe allumée sur son bureau. Il faisait des plans détaillés, des tables des matières parfaitement organisées, et puis tout se délitait, sa plume – ou sa petite machine à écrire, dans les années 1980 – l'emportant à chaque fois vers des contrées inattendues. Il n'hésitait jamais à suivre cet appel, même si ses digressions l'emmenaient parfois fort loin du but initial. C'est pourquoi, par exemple, son manuscrit *La Clef des songes*, qui devait comporter 12 chapitres, n'en contient que 7, formant un total de quelque 350 pages, alors que les notes ajoutées constituent un ensemble impressionnant de presque 700 pages, qui peuvent d'ailleurs être lues tout à fait indépendamment. En commençant son livre dans les années 1980, Grothendieck voulait explorer son expérience du rêve, mais ses pensées l'ont entraîné sur une tout autre

J'évoque tout d'abord Sigrid Undset, Kristin Lavransdotter et Olev Audunsson, sûrement inspirés, puis l'Olympe russe de mon enfance : Dostoïevski, Tolstoï, Gogol, Tourguénieff, Gorki, enfin Knut Hamsun (qui fut le grand parmi les grands pour Hanka), et Selma Lagerlöf (de Gösta Berling). L'impression se dégage que tous ces auteurs, à part sûrement Gorki et peut-être Selma Lagerlöf, ont été inspirés dans au moins certaines de leurs œuvres (Souvenirs de la Maison des Morts, Âmes Mortes, Victoria, Faim...).

Et dans une lettre à un ami, Grothendieck se souvient d'avoir chahuté un professeur du Collège Cévenol, au Chambon-sur-Lignon où il était hébergé pendant les dernières années de la Seconde Guerre mondiale :

Rudi et moi partagions avec lui la même langue maternelle, l'allemand, et l'arrière-fond de culture littéraire idoine (Goethe et Schiller notamment, que M. Steckler aimait à réciter avec emphase).

Rudi et moi n'en loupions pas une pour le contrefaire et le tourner en dérision, en invoquant l'autorité des « plus grands écrivains de tous les temps » (soit Goethe, soit Schiller, suivant la citation).

Si le jeune élève Grothendieck avait ses moments provocateurs, il a trempé dès son plus jeune âge dans la grande littérature, et les effets s'en ressentent dans tout ce qu'il a produit par la suite.

Une inspiration soufflée de l'extérieur

Dès le moment où il s'est mis à méditer et à noter les résultats de ses méditations – « une certaine nuit du mois d'octobre 1976 », à l'âge de 48 ans – Grothendieck s'est vu surtout en chercheur, et témoin, de vérité. L'inspiration – ses idées, le fruit d'une réflexion intense et concentrée, le plus souvent nocturne – lui semblait soufflée de l'extérieur. Ce qui lui parvenait ainsi n'était pas en soi un renseignement ou une observation, mais plutôt la capacité d'y voir clair, d'observer sans déformation, de s'affranchir de la peur ou des forces de l'ego ; et il sentait qu'il était la voie par laquelle ces vérités devaient éclater au grand jour. Selon les différentes périodes de sa vie, Grothendieck a attribué la source de cette compréhension à Dieu, aux anges ou au fait que lui-même était un mutant, et il a appliqué cette même écoute aux mathématiques, au sort de la planète, à la société ou à la psychologie humaine.

voie : une réflexion sur les connexions psychologiques entre créativité et révélation.

Grothendieck lisait et relisait ce qu'il écrivait, l'annotant encore et encore. Les annotations se trouvent tantôt en marge, montrant combien il avait changé d'avis sur les questions profondes qui occupaient sa pensée (telles que l'existence de l'inspiration divine ou du libre arbitre), tantôt sous forme de petits numéros insérés dans le texte, renvoyant à de longues notes ajoutées à la fin. Les œuvres de Grothendieck ont une structure arborescente, et pas toujours d'aboutissement bien clair. Très imagé, tantôt rêveur ou même extatique, tantôt ironique – c'est là que l'on voit percer une rare pointe d'humour –, tantôt plus direct, presque pédagogique, Grothendieck a un style bien à lui, plein de tournures particulières et d'une rare originalité due à sa spontanéité. Lire Grothendieck, c'est accepter de se laisser prendre par la main pour une promenade dont on ne connaît pas le but. C'est partir à la découverte, et le voyage en vaut la peine.

Beaucoup ont dit que Grothendieck ne lisait jamais rien ou presque. C'est peut-être vrai de sa période mathématique, lorsqu'il avait entre 20 et 42 ans. Travaillant seize heures par jour, totalement concentré sur les mathématiques, il n'avait pas le temps pour autre chose, se consacrant déjà trop peu à sa famille, sans parler de loisirs sportifs ou culturels. Mais avant et après cette période, il a lu énormément. Pendant son enfance, vivant auprès de sa mère Hanka, il ne pouvait en être autrement. Femme de lettres très cultivée, journaliste professionnelle dans sa jeunesse, Hanka a notamment écrit entre 1945 et 1957 un long roman autobiographique non publié, mais extraordinaire, *Eine Frau*.

Grothendieck lui-même se remémore ses lectures au cours d'une longue méditation sur la véritable nature de l'inspiration qu'il sentait souffler en lui. « Les auteurs que j'ai aimés, ou qui m'ont impressionné à certaines époques de ma vie, dans mon enfance notamment, étaient-ils inspirés ? » se demande-t-il :

Il ne se sentait pas seul de son espèce; d'autres avant lui, comme Freud, Gandhi ou le poète américain du XIX^e siècle Walt Whitman, avaient su voir et décrire cette sorte de vérité qu'il caractérisait d'évidente et pourtant cachée à la plupart des gens par un épais voile égotique substituant d'autres images, plus plaisantes, à celles que seuls les « mutants » perçoivent avec immédiateté.

Pendant les premières années de méditation, dans les années 1970 et 1980, ces explorations ont abouti à des révélations intérieures concernant sa propre existence, ses véritables motivations, le vrai sens de ses rêves et de ses actes. Cette période a donné lieu à *Récoltes et semailles*, *La Clef du yin et du yang*, puis *La Clef des songes*, ainsi qu'à une collection éparse de fragments et de poèmes et – comme à toutes les époques – à une abondante correspondance.

Pour s'exprimer, il avait recours à la poésie symbolique, quasi érotique, comme au raisonnement logique et serré. Dans un travail au titre ambitieux *Histoire de la Création*, écrit en 1992, on découvre une première partie intitulée « L'ère originelle, ou l'Amour et le Conflit », qui commence ainsi :

Aussi loin qu'elle regardait en arrière, toujours et à tout moment, il y avait eu l'Autre. Son regard était là, fasciné, la fouillant jusque dans les mouvements les plus déliés et les plus reculés de son âme, comme pour étreindre et pour prendre possession de ce qui pourtant, mystérieusement et inexorablement, toujours lui échappait. Même quand elle se donnait à lui, et même dans ces moments entre tous où toute réserve, toute prudence en elle s'était évanouie, effacées par cet élan d'amour se donnant tout entier – même en ces rares moments, le meilleur pourtant toujours lui échappait.

bien antérieur à ce texte, issu de *La Clef du yin et du yang* (1983-1985), il décrit sa première expérience, toute personnelle, de cette découverte, dans un passage qui garde toute sa pertinence aujourd'hui, à l'heure où la notion de genre suscite tant de débats :

C'était au mois de juillet 1976, au cours d'une courte liaison amoureuse avec une jeune femme, G., peut-être un brin plus « hommasse » dans ses façons d'être que les femmes que j'avais aimées précédemment. Le hasard (?) a voulu que les circonstances matérielles qui ont entouré ces amours étaient telles, que je me voyais placé dans un rôle typiquement « féminin ». Je faisais le ménage et préparais les repas du soir, en attendant que le conjoint rentre d'une longue et fatigante journée de travail : garder dans les collines un troupeau de cent cinquante chèvres, qu'elle devait de plus encore traire le soir. Il se

Si R & S garde une valeur à mes yeux, c'est à cause des quelques humbles actes de vérité que l'écriture m'a amenés à y faire (et d'un ou deux autres qui y sont évoqués) : le constat sans faux de tels moments de vanité aveugle en moi, de tels moments où j'ai été ridicule, ou injuste, voire malhonnête au odieux. Tout le reste du R & S servait pour vanité, un règlement de comptes dans "le beau monde", un jeu d'artifice de philosophie "à l'enlèvement", s'il n'y avait sa.

Leila Schargus



© HES René Bouillot

HONNÊTE ET LUCIDE, Alexandre Grothendieck (ci-dessus, dans les années 1960) cherchait à l'être d'abord envers lui-même et son œuvre, comme le montre cet extrait d'une lettre à l'auteur.

Plus tard, et surtout après son retrait volontaire en 1991, il a étendu ses réflexions aux autres personnes et à la société tout entière, toujours à l'affût de l'évidence invisible, celle qui lui révélerait les ressorts véritables des comportements humains. Comme le mathématicien qu'il était, il cherchait le sens des choses dans la structure et ses écrits sont jonchés de diagrammes complexes reliant les aspects de l'âme humaine, les éléments, les symboles, les émotions. Ce qui frappe, dans l'ensemble de son travail, c'est qu'il n'a jamais cru à l'inanité des choses, à leur caractère aléatoire. Si la présence du Mal – avec une majuscule – le dérangeait au point de le pousser parfois à des accès de déraison, il n'a jamais cessé d'en chercher le sens, jusqu'à remonter aux origines de l'existence.

Pour Grothendieck, du moins à ce stade de sa réflexion, le Mal est la conséquence inexorable du conflit originel entre le masculin et le féminin. Non pas entre les hommes et les femmes, mais en chaque être, car chacun possède des traits aussi bien masculins que féminins, d'où une profonde fracture intérieure. Pour lui, de façon quasi biblique, ce conflit précède le langage, l'être humain, la vie sur Terre, faisant partie de la structure définissant l'Univers. L'attraction érotique entre le masculin et le féminin, et l'impossibilité pour l'un de jamais atteindre ou posséder entièrement l'autre, voilà pour Grothendieck la source profonde de toutes les souffrances. Il n'y a qu'une solution : que chacun parvienne à résoudre le conflit à l'intérieur de lui-même, et commence par en prendre conscience. Dans un passage

trouvait que ce rôle inhabituel d'épouse au logis m'allait comme un gant. La chose peut paraître minime – pourtant, ça a fait « tilt » alors. Le lien s'est fait en moi avec certaines pulsions et désirs dans ma vie amoureuse, s'exprimant alors et pour la première fois dans certains poèmes d'amour, où le vécu amoureux apparaît, sans ambiguïté aucune, comme « féminin ».

J'ai compris alors, sans réflexion ou « effort », sans velléité de réticence ou de gêne, que dans mon corps comme dans mes désirs, dans mes sentiments et dans mon esprit, j'étais femme, en même temps que j'étais homme – et qu'il n'y avait aucun conflit d'aucune sorte entre ces deux réalités profondes en mon être. En ces jours-là, la note dominante était féminine – et j'acceptais cette chose avec reconnaissance, dans un muet étonnement. Quand j'y pensais, il y avait en moi une joie silencieuse, très douce.

Il s'agit ici d'un moment de prise de conscience qui a ouvert la porte à des années de réflexion ultérieures. Plus les années passaient, plus les écrits de Grothendieck se concentraient autour de la seule question de « l'existence dans notre univers de souffrance, d'humiliations, de victimes ». Pourquoi tant de misère humaine ? D'une manière qui me semble unique au monde, il relie directement ce phénomène à l'aveuglement de la psyché humaine vis-à-vis des causes profondes de cette misère, dont la connaissance risque de faire déchoir une belle « image de soi » et déstabiliser ceux dont le Moi est construit sur cette image, les laissant en proie à des peurs innombrables. Pour tous les humains qui ne sont pas des mutants (mais heureusement, des mutants existent un peu partout), rien n'est d'une importance aussi primordiale que la protection de l'image de la moindre égratignure. « C'est surtout ça, Leila, » m'a-t-il écrit, « la "misère humaine" dont je parle, votre misère : cette impuissance-là à reconnaître en soi, ne serait-ce que le moindre bout de vanité, de ridicule, de mensonge. »

La vraie nature de l'horreur

Qui étudie la souffrance humaine au XX^e siècle ne peut ignorer la Shoah. Grothendieck aborde le sujet après un long périple personnel. Il semblerait que, s'il savait depuis des décennies que son père avait été déporté en 1942 à Auschwitz, où il a trouvé la mort, c'est seulement dans les dernières années de sa vie que cet événement a pris pour lui un sens intime, personnel. Peut-être est-ce le volume listant les convois des déportés de France, qu'un ami lui avait apporté, qui déclencha cet éveil. Ce volume contenait, parmi tant d'autres, le nom de son père, Sascha Schapiro (dit Tanaroff). Il a eu un fort impact sur Grothendieck, qui s'est mis à recopier, chaque jour, quelques-uns des noms de ces victimes de la déportation, pas tant pour les sauver de l'oubli que pour inscrire leurs souffrances dans sa chair, ou dans son âme. C'est à ce moment qu'il semble ressentir pour la première fois que le judaïsme – celui de son père ne semble pas l'avoir intéressé auparavant – recelait peut-être un véritable sens, un sens qui le concernait, lui. Dans une lettre à une ancienne amie, il écrit :

Sachez que pour moi [...] « être juif » ne m'a jamais posé problème, pas plus qu'être

allemand, ou (une fois « naturalisé ») français, après avoir été apatride une trentaine d'années durant. Par contre, j'ai appris l'existence d'un peuple juif, il y a moins d'un an. Et que mon destin est lié de près à celui de ce peuple, sur lequel j'ai des clefs, et des lumières...

Si la réalité des victimes de la Shoah l'a profondément frappé, les textes qu'il s'est mis à lire sur le sujet, en revanche, l'ont peu impressionné. Comme beaucoup de gens, des survivants de la Shoah en particulier, il trouvait que les écrits qui lui tombaient sous la main ne parvenaient absolument pas à communiquer la vraie nature de l'horreur, que le public non plus ne voulait pas vraiment savoir. Ainsi, il crache sur les œuvres destinées à « un grand public distingué, à présent grand consommateur de Shoah-et-tout-ça » :

Un « public Shoah », qui en demande et en redemande, né comme par enchantement dans la foulée du Mémorial. Public friand, nous voilà ! (merci, merci ! Militants de la Mémoire), après 40 ans d'indifférence honteuse au scandale et à la honte de la Shoah, et au scandale et à la honte, pires, de l'après-Shoah : l'impunité des « bourreaux nazis » et de leurs prête-main français, et (inséparable de celle-ci) le silence pudique de tous sur le sort des victimes. Comme on se cacherait, chut ! d'une maladie honteuse, la plus honteuse des maladies : avoir subi, humiliés, sans défense, mépris, violence, massacre – et à présent, le silence pudique...

Ce passage réunit à lui seul les traits les plus saillants de la pensée grothendieckienne : l'horreur, c'est mal, mais la capacité humaine – individuelle ou collective – d'accepter toutes les horreurs sans se livrer à une insurrection totale qui y mettrait fin une fois pour toutes est un mal encore bien pire. Cette pensée représente la conclusion logique de la vie ratée de son père, anarchiste militant qui avait consacré sa vie à changer le monde, et qui y croyait dur comme fer jusqu'à ce que l'impossibilité évidente de sa tentative ne le réduise au désespoir.

Peut-être, tout comme lui, Grothendieck a-t-il tenté l'impossible. Mais la tentative est d'une telle puissance et d'une telle justesse que nul ne peut y rester tout à fait indifférent après en avoir pris connaissance. Poésie, allégorie, érotisme, plaidoyers, correspondance, autobiographie – autant d'efforts désespérés pour communiquer les vérités qu'il voyait à un monde qui se fermait à lui –, c'est cela, l'héritage littéraire d'Alexandre Grothendieck. ■

■ L'AUTEURE



Leila SCHNEPS est directrice de recherche du CNRS à l'Institut de mathématiques de l'université Pierre-et-Marie-Curie, à Paris.

La misère humaine est l'impuissance à reconnaître en soi ne serait-ce que le moindre bout de mensonge

■ À ÉCOUTER

Une conférence donnée par Alexandre Grothendieck au CERN en 1972 sur le thème : « Allons-nous continuer la recherche scientifique ? » <http://bit.ly/2aDwI9T>.

Aux origines génétiques de l'obésité

Richard Johnson et Peter Andrews

Selon une hypothèse émise en 1962, un gène favorisant le stockage des graisses a aidé nos lointains ancêtres à traverser les périodes de disette et expliquerait la pandémie actuelle d'obésité et de diabète. Les chercheurs pensent avoir identifié ce « gène d'épargne ».



L'ESSENTIEL

- Le refroidissement du climat européen il y a 16 millions d'années a fait disparaître les forêts où vivaient les grands singes européens.
- Une mutation du gène codant l'enzyme uricase aurait aidé ces animaux à stocker des graisses et, ainsi, à survivre.
- Ce gène s'est transmis aux hominidés et nous prédisposerait aujourd'hui à l'obésité et au diabète.
- Consommer moins de fructose devrait nous aider à lutter contre l'obésité et ses complications.

© Gettyimages/Kelly/Mooney Photography

En 1962, le généticien américain James Neel s'attaque à l'épineuse énigme du diabète de type 2. Pourquoi cette maladie se traduisant par des concentrations anormalement élevées de glucose dans le sang existe-t-elle ? S'il est d'origine génétique, ce diabète n'aurait-il pas dû disparaître avec les porteurs des gènes défectueux ? se demande Neel. Nos ancêtres ne pouvant le traiter, il aurait dû affecter la reproduction de ses porteurs, qui n'auraient pas dû le transmettre. Bref, la sélection naturelle aurait dû éliminer le diabète de type 2 et sa prévalence – le pourcentage de gens atteints – n'aurait jamais dû augmenter.

Neel a passé beaucoup de temps à étudier des populations indigènes qui, bien qu'elles soient présumées porteuses du variant du gène lié au diabète de type 2, ne comptent presque pas d'obèses (l'obésité augmente le risque de développer un diabète de type 2). Le contraste entre ces peuplades et les sociétés développées lui suggéra une hypothèse. Des disettes assez sévères pour entraîner une famine durable

s'étaient sûrement produites dans le passé ; au cours de ces périodes, les porteurs d'un variant de gène qui rend l'organisme particulièrement « efficace dans l'absorption ou l'utilisation des aliments » stockaient, sous forme de graisse, une grande partie des rares calories. Ce supplément de graisse aurait conféré aux porteurs de ce gène – dit « gène d'épargne » ou « gène économe » – un avantage en cas de famine. Durant les périodes d'abondance, comme c'est le cas de nos jours, ce caractère conduirait à un excès de poids et donc au diabète.

Le gène d'épargne, une idée cinquantenaire

L'hypothèse émise par Neel a été contestée, mais depuis un demi-siècle, elle perdure sous une forme ou une autre. Nous venons de la réexaminer et nous avons trouvé des raisons de la confirmer, pour l'essentiel. Toutefois, nous ne plaçons pas sa logique dans le passé humain, mais plutôt dans un lointain passé hominoïde, où vivaient des grands singes ancêtres des hominidés. Si



nous avons raison, alors notre approche éclairera l'émergence du genre *Homo* et désignera un gène particulièrement délétère, puisqu'il serait responsable de nombreuses pathologies modernes...

L'idée que notre organisme pourrait être génétiquement programmé pour stocker les graisses, de sorte que notre trop riche alimentation entraînerait la surexpression du gène d'épargne, a suscité d'intenses recherches. Les chercheurs se sont avant tout efforcés d'identifier le gène d'épargne supputé par Neel, ce gène censé être à l'origine du diabète, de l'hypertension (pression artérielle élevée), de la stéatose hépatique (présence de graisse dans les cellules du foie) non alcoolique et des maladies cardiaques.

Une histoire de changement climatique

Selon les détracteurs de l'hypothèse de Neel, les périodes de disette traversées par nos ancêtres humains étaient trop rares et trop brèves pour que des gènes favorisant le stockage des graisses soient sélectionnés. Par ailleurs, pointent-ils, aucun gène d'épargne n'a été identifié avec certitude pour le moment.

Neel et ses contemporains pensaient qu'un gène d'épargne était apparu à l'époque où les premiers humains parcouraient les plaines de l'Afrique de l'Est. L'histoire de notre lignée débute cependant beaucoup plus tôt, à une époque où les grands singes hominoïdes qui allaient donner les humains étaient encore relativement nouveaux. Or il s'agit d'une histoire pleine de crises climatiques, de famines et d'adaptations pour la survie.

Les premiers grands singes hominoïdes se seraient séparés du rameau simien il y a quelque 26 millions d'années, en Afrique de l'Est probablement. Du moins est-ce l'âge des plus anciens fossiles de *Proconsul*, le plus connu des hominoïdes anciens. Ces premiers hominoïdes étaient des quadrupèdes vivant la plupart du temps dans les arbres, comme les singes. Mais ils avaient un grand corps sans queue ainsi qu'un crâne, donc un cerveau, plus grand que celui de leurs cousins simiens.

■ LES AUTEURS



Richard J. JOHNSON est professeur de médecine à l'université du Colorado, aux États-Unis.

Peter ANDREWS est chercheur émérite au Muséum d'histoire naturelle de Londres et professeur au département d'anthropologie de l'University College de Londres.

Cette
mutation apparue
il y a des millions
d'années
aurait aidé des espèces
ancestrales à résister
aux hivers devenus
froids et secs

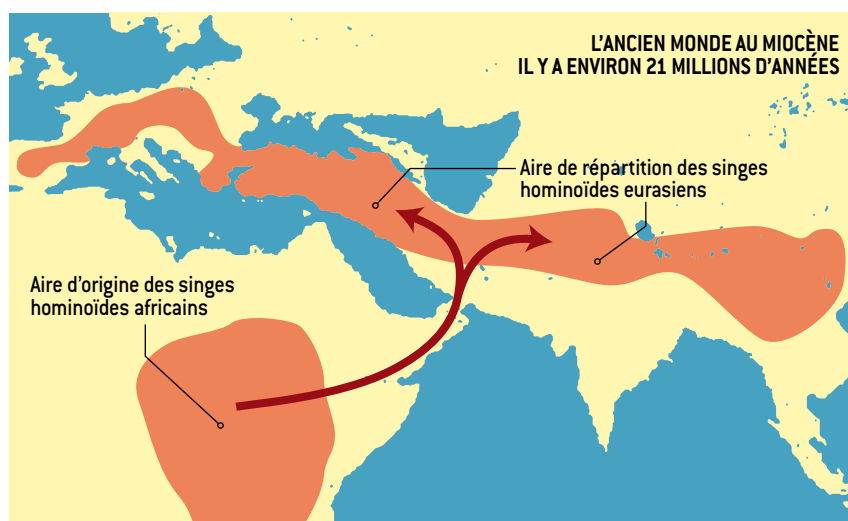
L'Afrique était alors une étendue tropicale couverte de forêts d'arbres à feuilles caduques plus ou moins humides. Les hominoïdes s'y nourrissaient surtout de fruits et le registre fossile nous apprend qu'ils s'étaient diversifiés en 14 espèces différentes.

Le climat terrestre, toutefois, s'est peu à peu refroidi. Des calottes polaires se sont formées, ce qui a abaissé le niveau de l'océan mondial. Il y a quelque 21 millions d'années, le continent insulaire qu'était alors l'Afrique s'est rattaché à l'Eurasie par toute une série de ponts terrestres (voir la figure page ci-contre). Les fouilles effectuées en Turquie, en Allemagne et en Espagne par nombre de paléontologues (dont l'un de nous) montrent que des girafes, des éléphants, des antilopes et même des oryctéroptères (des mammifères termitivores) ont migré d'Afrique en Eurasie. Des grands singes ont accompagné ces migrations, tels *Griphopithecus* et *Kenyanpithecus*, dont on a retrouvé des traces près de l'actuel village turc de Pasalar.

Après leur arrivée en Eurasie, les grands singes ont d'abord prospéré dans les forêts subtropicales d'arbres à feuilles persistantes et les bois humides d'arbres à grandes feuilles, c'est-à-dire partout où il y avait des fruits en abondance. Ils se sont diversifiés en 8 espèces d'au moins 5 genres, dont *Dryopithecus* et *Ankarapithecus*. À partir des dépôts vieux de 16,5 millions d'années de Pasalar, Peter Andrews et ses collègues ont montré que le climat ressemblait à celui du nord de l'Inde actuelle, qui comporte des moussons d'été suivies de longues sécheresses et d'hivers frais sans gelées.

Ensuite, à mesure que se poursuivait le refroidissement de la Terre, le climat est devenu plus sec. La forêt s'est progressivement transformée en savane, tandis que les fruits se sont raréfiés pendant l'hiver. Les fouilles de Peter Andrews, dans les années 1980 et 1990, suggèrent que les espèces fossiles de grands singes vivaient davantage au sol que dans les arbres. Cela les aurait amenés à parcourir des territoires plus étendus. D'après l'étude de l'usure de dents fossiles et de l'épaississement de leur émail, ces grands singes affamés se sont rabattus sur d'autres aliments que les fruits, tels les tubercules et les racines.

Puis est venu un temps où les grands singes eurasiatiques ont beaucoup souffert



AU DÉBUT DU MIOCÈNE, il y a quelques 23 millions d'années, l'Afrique est insulaire, mais les forces tectoniques sont sur le point de la raccorder à l'Eurasie. De nombreuses espèces africaines migrent alors vers le nord, dont plusieurs espèces de grands singes hominoïdes. Une douzaine de millions d'années plus tard, certains de leurs descendants, qui se sont adaptés à un climat de plus en plus froid et sec en acquérant une meilleure capacité à stocker les graisses, migreront vers l'Afrique, où naîtra le genre humain.

de la faim en hiver. À Pasalar, Peter Andrews et Jay Kelley, aujourd'hui à l'université d'État de l'Arizona, ont découvert des fossiles de jeunes *Kenyapithecus kizili* dont les incisives présentent des striations révélatrices de périodes intermittentes de stress alimentaire ou de famine. D'autres paléontologues ont décrit ces mêmes striations dentaires sur *Dryopithecus*, un hominoïde qui, il y a entre 12 et 9 millions d'années, vivait dans le bassin de Vallès-Penedès en Espagne. Il s'est alors mis à faire de plus en plus froid, de sorte qu'il y a environ 7 millions d'années, les derniers grands singes eurasiatiques ont disparu.

Le gène d'épargne serait celui de l'uricase

C'est ce qu'il semblait du moins. Depuis, les indices fossiles nous suggèrent d'une part que certains grands singes européens auraient migré vers l'Asie, où ils sont devenus les ancêtres des gibbons et des orangs-outangs, et d'autre part que d'autres seraient retournés en Afrique, où ils auraient évolué pour donner les grands singes africains, puis les hominidés, puis les humains. *Kenyapithecus kizili* était peut-être une espèce de grand singe européen qui a migré d'Eurasie en Afrique. Ses dents et ses mâchoires sont en effet similaires à celles de *Kenyapithecus wickeri*, un grand singe qui a vécu en Afrique 2 millions d'années après *Kenyapithecus kizili*.

Les indices d'un grand refroidissement climatique en Europe il y a quelques 15 millions d'années et les constatations que l'on peut faire en génétique humaine nous ont conduits à relancer l'idée du gène

d'épargne. Nous proposons de l'identifier au gène qui, chez de nombreux animaux, code l'enzyme uricase. Ce gène est en effet muté chez tous les hominidés modernes (gorilles, orangs-outangs, chimpanzés, bonobos et humains), ce qui inhibe la synthèse de cette enzyme, aussi nommée urate oxydase. En outre, tous les hominidés ont la même forme mutante du gène, ce qui indique qu'ils l'ont hérité d'un ancêtre commun.

En se fondant sur la théorie de l'horloge moléculaire, c'est-à-dire sur l'idée que les mutations génétiques s'accumulent dans une lignée à un rythme constant, Naoyuki Takahata, du SOKENDAI (Collège doctoral de recherche avancée) à Hayama au Japon, et des collègues, ainsi qu'Eric Gaucher de l'Institut de technologie de Géorgie à Atlanta, ont estimé que cet ancêtre commun à tous les hominidés aurait vécu il y a entre 17 et 13 millions d'années – c'est-à-dire à l'époque où les grands singes européens luttèrent pour survivre aux famines hivernales.

Par ailleurs, une mutation différente a aussi réduit au silence le gène de l'uricase chez les ancêtres des gibbons, qui vivaient à la même époque, en Europe comme en Asie probablement. Ces constatations laissent penser que l'inactivation de l'uricase a favorisé la survie des anciens grands singes européens au cours des famines. Mais de quelle façon ?

Un élément de réponse provient de recherches sur l'origine de l'hypertension artérielle et des maladies cardiaques. Quelle est la fonction biologique de l'uricase ? Chez la plupart des animaux, cette enzyme catalyse la décomposition de l'acide urique. Cette molécule, de formule brute

$C_5H_4N_4O_3$, est l'un des déchets organiques produits au cours de la métabolisation des aliments, c'est-à-dire de leur conversion en énergie et en nutriments cellulaires. Chez les grands singes, la mutation du gène codant l'uricase aurait modifié l'enzyme de telle façon qu'elle serait devenue non fonctionnelle. La conséquence en est une accumulation d'acide urique dans le sang.

Une mutation qui favorise l'acide urique

Dans les conditions normales de vie, cette accumulation peut devenir pathologique, puisque l'acide urique excédentaire peut précipiter et former des cristaux dans les articulations (ce qui est à l'origine de la goutte) ou dans les reins (ce qui produit des calculs rénaux). Toutefois, comme ceux des autres hominidés, les organismes humains sont normalement capables d'évacuer assez efficacement l'acide urique par les urines, de sorte que la mutation du gène en question n'a pour effet que d'augmenter modérément le taux d'acide urique. De fait, les grands singes africains ont des taux d'acide urique légèrement supérieurs à ceux des autres animaux, tout comme les ethnies ayant conservé leur mode de vie traditionnel, tels les Yanomamis, une population indigène d'Amazonie.

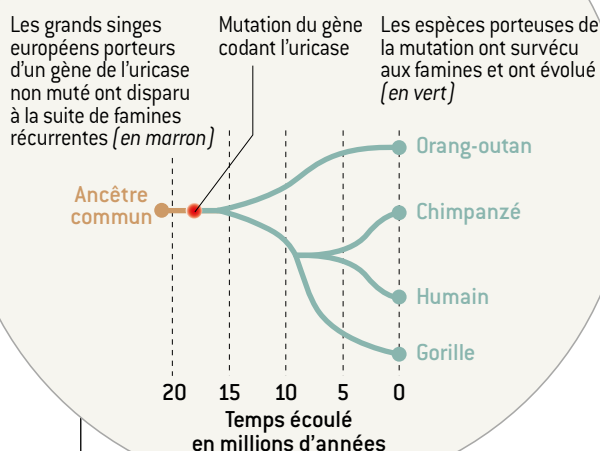
Dans les sociétés où prévalent des régimes alimentaires occidentaux et des habitudes sédentaires, les taux moyens d'acide urique sont en augmentation. Les personnes obèses ou cardiaques présentent aussi des taux sanguins d'acide urique supérieurs à ceux de personnes minces et en bonne santé ; elles ont aussi des taux

LA LOINTAINE MUTATION QUI A SAUVÉ NOS ANCÊTRES HOMINOÏDES

D'après les auteurs, la mutation du gène codant l'enzyme uricase s'est produite il y a des millions d'années chez une espèce ancestrale de grands singes européens. Cette mutation aurait aidé cette espèce à survivre aux famines qui se multipliaient à cause d'un refroidissement climatique, tandis que les autres espèces de grands singes européens s'éteignaient. Les survivants ont fini par quitter l'Europe pour se réfugier en Afrique et en Asie du Sud-Est, où ils ont

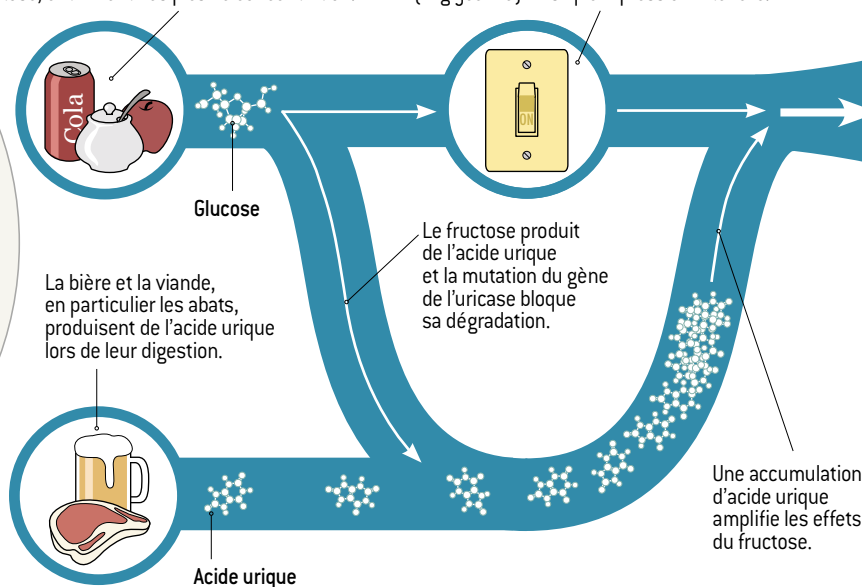
transmis la mutation à leurs descendants, dont les humains font partie. La mutation du gène codant l'uricase a favorisé la survie lors des périodes de famine parce qu'elle amène l'organisme à stocker des calories sous la forme de graisses plutôt que de les brûler tout de suite. Lorsque la nourriture est disponible en abondance, comme aujourd'hui, cette mutation contribuerait à l'obésité et aux maladies qui lui sont associées, tel le diabète de type 2.

Le « gène d'épargne » est apparu chez les grands singes



La consommation de fruits augmente les niveaux de fructose dans le sang et le foie ; les aliments riches en saccharose ou le sirop de maïs, riche en fructose, entraînent des pics de concentration.

Des niveaux élevés de fructose actionnent un mécanisme qui déclenche le stockage des graisses et augmente la concentration de glucose dans le sang (la glycémie) ainsi que la pression artérielle.



sanguins élevés de cholestérol et de triglycérides (graisses).

Afin d'identifier statistiquement lesquelles de ces substances entraînent des pathologies cardiovasculaires, les auteurs de la très influente étude de Framingham (*Framingham Heart Study*), aux États-Unis, ont suivi les mêmes patients pendant des décennies. En 1999, ils rapportaient qu'un niveau élevé d'acide urique ne provoque pas, en soi, de maladie. Selon eux, la responsable serait plutôt l'hypertension artérielle, une pathologie qui, en plus d'augmenter le risque cardiaque, accroîtrait par ailleurs le taux d'acide urique.

Richard Johnson, l'un de nous, était gêné par cette conclusion, car les auteurs de l'étude de Framingham ont omis d'appliquer un principe de base de la méthodologie biologique : ils n'ont pas vérifié leur thèse sur des animaux de laboratoire. Marilda Mazzali, une collaboratrice de Richard Johnson, a comblé cette lacune expérimentale.

L'équipe de ce dernier avait établi il y a quelques années que l'apparition chez le rat de microlésions rénales peut provoquer de l'hypertension artérielle. À l'aide d'une substance bloquant l'uricase, Marilda Mazzali a cherché à savoir si une hausse des niveaux d'acide urique augmente la pression artérielle et nuit à la fonction rénale. Lors d'expériences précédentes, aucune microlésion rénale n'était apparue. Nous nous attendions donc à ce que l'augmentation du taux sanguin d'acide urique n'ait pas d'effet sur les reins, ni sur la tension artérielle.

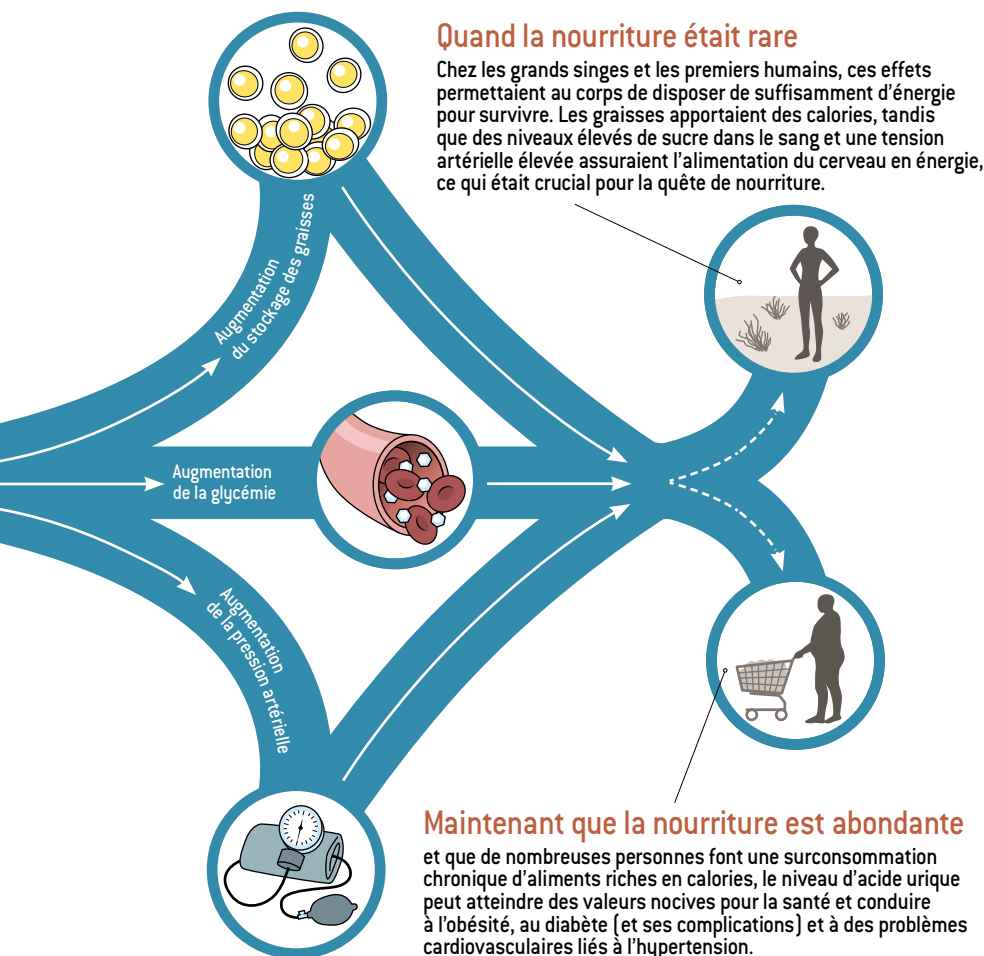
L'acide urique, facteur d'hypertension

Aussi est-ce avec beaucoup de surprise que nous avons appris que les rats de Marilda Mazzali avaient développé de l'hypertension. L'équipe de Richard Johnson a alors mené toute une série d'études afin de le

vérifier. Les chercheurs ont identifié deux mécanismes qui contribuent à l'hypertension. Ils ont tout d'abord constaté que l'acide urique entraîne rapidement un stress oxydatif, un ensemble de réactions biochimiques provoquant une vasoconstriction des vaisseaux sanguins et, ainsi, une augmentation de la pression artérielle. Une diminution du niveau d'acide urique inverse cet effet.

L'autre mécanisme identifié est le suivant : un excès prolongé d'acide urique entraîne une lésion et inflammation légères, mais durables, des reins. Cela les rend moins aptes à évacuer les sels, ce qui a pour effet d'augmenter la pression artérielle. Cet effet peut être inversé par un régime pauvre en sel, mais pas en diminuant le niveau d'acide urique.

Afin de savoir si l'organisme humain réagit de la même façon à un taux élevé d'acide urique, Richard Johnson et Daniel Feig, un néphrologue pédiatrique travaillant



Pendant ces phases de leur vie, les oiseaux et les mammifères basculent naturellement dans un état prédiabétique. Leur sang s'enrichit en sucre. La digestion des glucides produit en effet du glucose, qui s'accumule dans le sang. Le pancréas réagit en libérant de l'insuline, qui indique au foie et aux muscles de convertir ce glucose en acides gras, triglycérides et glycogène, molécules qui stockent l'énergie. Lorsque la nourriture se fait rare, les animaux doivent continuer à s'alimenter afin de survivre, et pour ce faire leur cerveau a besoin d'un apport régulier de glucose. C'est pourquoi le métabolisme des écureuils, des passereaux et de tous les animaux en état de sous-nutrition change afin de rendre les cellules de l'organisme insensibles à la stimulation par l'insuline. Cette « résistance à l'insuline » leur permet de maintenir assez de glucose dans le sang pour alimenter le cerveau.

Du fructose à l'obésité

Conscients de cela, Richard Johnson et d'autres chercheurs ont supposé l'existence d'un mécanisme de déclenchement de l'accumulation des graisses dans l'organisme et son entrée en état prédiabétique. Les oiseaux, les ours et les orangs-outangs se gavent de fruits pour stocker des graisses en vue de la mauvaise saison, il a supposé que le signal actionnant cet interrupteur pourrait être le fructose, le sucre des fruits.

Takuji Ishimoto et Miguel Lanasa, deux chercheurs du laboratoire de Richard Johnson, ont alors mené des expériences qui ont confirmé cette hypothèse. En effet, des souris soumises à un régime riche en fructose mangent plus et bougent moins que les autres, tout en tendant à accumuler des graisses. Cette accumulation se produit en partie parce que le fructose atténue l'effet de l'hormone de la satiété – la leptine –, qui indique au cerveau qu'il est temps d'arrêter de manger.

Contrairement à ce qui est le cas pour d'autres sucres, la dégradation du fructose au sein des cellules produit de l'acide urique. Richard Johnson s'est donc demandé si l'acide urique serait le médiateur de certains effets du fructose. Dans le même laboratoire, Takahiko Nakagawa a donc soumis des rats à un régime riche en fructose et a administré de l'allopurinol à la moitié d'entre eux, pour abaisser leur niveau d'acide urique. Il a constaté que la

à l'École de médecine de Baylor, à Houston, ont mesuré les taux d'acide urique d'adolescents obèses, à qui on venait de diagnostiquer de l'hypertension. À leur grande surprise, ils ont constaté que chez 90 % de ces jeunes patients, le taux d'acide urique était élevé. Dans le cadre d'un essai clinique, ils ont alors traité 30 de ces patients à l'aide d'allopurinol, un hypo-uricémiant, c'est-à-dire un médicament qui abaisse le taux d'acide urique, mis au point pour soigner la goutte. Chez 85 % de ces jeunes gens dont les taux d'acide urique avaient notablement baissé, l'allopurinol a rétabli une pression artérielle normale.

Richard Johnson et Daniel Feig ont publié leurs résultats en 2008 et, depuis, d'autres études pilotes les ont reproduits. Toutefois, une vaste étude clinique sera nécessaire pour établir clairement qu'une réduction médicamenteuse du taux d'acide urique corrige une hypertension artérielle nouvellement diagnostiquée.

Comme l'hypertension semble résulter de l'obésité et de l'inactivité, Richard Johnson s'est demandé si l'acide urique entraînerait non seulement de l'hypertension, mais aussi le surpoids lui-même. Il a donc décidé d'examiner de quelle façon nos ancêtres lointains – qu'il s'agisse de petits mammifères comparables à des rongeurs ou de grands singes – ajustaient leur métabolisme lorsqu'ils étaient confrontés à des périodes d'abondance ou au contraire de disette.

Dans la nature, quand la disette devient famine, ce sont les plus gras qui survivent. De façon générale, les mammifères tendent à accroître leurs réserves de graisses afin d'augmenter leurs chances de survivre à l'hiver. De même, les oiseaux engraisent pour résister aux longs hivers rigoureux ou pour effectuer une longue migration. Ainsi, ces animaux se gavent instinctivement quand ils sentent approcher des périodes difficiles.

pression artérielle de ces rats diminuait, ce qui confirmait les précédents résultats de l'équipe. En même temps, l'allopurinol avait pour effet de faire disparaître plusieurs caractéristiques du syndrome métabolique, un ensemble de symptômes incluant un bas taux de lipoprotéine de haute densité (HDL, le « bon cholestérol »), une forte concentration sanguine de glucose et de triglycérides (graisses), un excès de graisse abdominale et de l'hypertension.

Et dans une étude distincte portant sur des cellules humaines de foie cultivées en laboratoire, les chercheurs ont montré qu'une réduction du taux d'acide urique tend à empêcher les cellules de transformer le fructose en graisses. Cela implique qu'un niveau plus élevé d'acide urique facilite cette transformation.

Un tableau clair se dessine ainsi. Une alimentation riche en fructose actionne le déclencheur d'engraissement, et l'absence d'uricase fonctionnelle chez les grands singes et les humains conduit à des niveaux élevés d'acide urique, ce qui amplifie les effets du fructose. Cette chaîne amplificatrice entraînerait un dysfonctionnement métabolique et son cortège de risques cardiaques et diabétiques.

En juin 2008, alors qu'émergeait ce tableau, nous nous sommes rencontrés au Muséum d'histoire naturelle de Londres, où Peter Andrews dirige ses recherches sur l'évolution des humains et des grands singes. Nous avons alors essayé de comprendre comment le gène muté de l'uricase a pu aider les hominoïdes européens à survivre au grand refroidissement qui a débuté il y a quelque 15 millions d'années.

L'idée qui est ressortie de nos discussions est la suivante : le déficit en uricase fonctionnelle aurait augmenté le niveau d'acide urique, ce qui aurait aidé les porteurs de la mutation à produire de la graisse à partir de leur nourriture, riche en fruits. Cette meilleure efficacité métabolique dans la production de graisse corporelle aurait facilité la survie quand les hivers sont peu à peu devenus froids et secs.

Malgré le refroidissement, du moins dans un premier temps, il a fait passablement chaud assez longtemps, pensons-nous, pour que les figuiers tropicaux subsistent. Or

ces arbres très répandus produisent toute l'année. Les grands singes pouvaient donc consommer des fruits, notamment des figues, ce que les chimpanzés, les gorilles en Afrique et les orangs-outans en Asie du Sud-Est insulaire font toujours. Puis, lorsque le climat européen est passé de subtropical à tempéré, les figuiers se sont raréfiés et ont cessé de donner des fruits en hiver. Les grands singes européens ont alors commencé à souffrir régulièrement de la faim pendant la mauvaise saison.

Nous avons alors supposé que la mutation désactivant l'uricase a rendu les grands singes européens capables de convertir le fructose en graisse en vue des saisons froides. Quelques millions d'années plus tard, les descendants de ces grands singes auraient emporté cette mutation en Afrique,

fonctionnelle est le gène d'épargne ne peut à ce stade être considérée comme prouvée, puisqu'il existe déjà nombre de candidats au rôle de gène d'épargne. Avant l'émergence de notre hypothèse, les chercheurs ont en effet longtemps travaillé à identifier de possibles gènes d'épargne ; ils se sont concentrés pour cela sur des variants de gènes (des polymorphismes génétiques) susceptibles d'expliquer l'épidémie actuelle d'obésité et de diabète.

Une hypothèse qui reste à prouver

Ils en ont trouvé, qui, certes, prédisposent à ces maladies, mais aucun ne suffit, à lui seul, à expliquer l'épidémie. Soulignons en passant que cette chasse tous azimuts aux polymorphismes ne pouvait aboutir à identifier le gène de l'uricase non fonctionnelle, car sa séquence d'ADN ne varie pas, tout en étant présente chez tous les humains.

Ceux qui doutent de la pertinence de l'hypothèse de Neel ont aussi soutenu qu'un gène d'épargne n'a pu apparaître que si l'obésité procurait un avantage aux anciens humains. Or le gène de l'uricase a muté bien avant l'apparition du genre humain... Cette mutation a conféré un avantage de survie en cas de famine non pas à des humains, mais bien aux singes hominoïdes, leurs ancêtres. Son intérêt était d'aider à traverser les famines, et non pas de faire grossir, même si le gène muté a cet effet chez les humains d'aujourd'hui.

D'autres encore affirment que si nous avions tous un gène d'épargne, l'obésité serait beaucoup plus fréquente de nos jours. Toutefois, lorsqu'on se nourrit de façon traditionnelle, le fait d'avoir une uricase inactive ne fait qu'augmenter légèrement les taux d'acide urique dans le sang. Selon nous, le gène entraîne des hausses importantes du niveau d'acide urique en réaction à deux types d'aliments du régime occidental : ceux qui produisent de l'acide urique – la bière par exemple – et ceux qui contiennent ou produisent beaucoup de fructose. Parmi ces derniers figurent le miel et les aliments industriels, riches en sucre de table (saccharose, qui se décompose

On a trouvé d'autres gènes de prédisposition, mais aucun n'explique à lui seul la pandémie actuelle d'obésité et de diabète

de sorte qu'ils auraient été mieux équipés pour survivre aux famines que les autres grands singes africains.

Si ces descendants des grands singes européens ont été en mesure de supplanter les grands singes africains de cette époque, les hominidés seraient les descendants d'ancêtres européens, ou du moins eurasiens, dont les ancêtres auraient été sélectionnés par le froid. Il s'ensuit que le gène muté codant une uricase non fonctionnelle serait ce gène d'épargne de Neel tant recherché.

Malgré tous les arguments rassemblés, notre idée que le gène codant l'uricase non



lors de la digestion en glucose et fructose) ou en sirop de maïs, riche en fructose. Et quand le niveau d'acide urique atteint des sommets, le risque d'obésité et de diabète est beaucoup plus grand.

En 2014, Eric Gaucher, James Kratzer et Miguel Lanasa ont publié certaines des preuves de laboratoire les plus convaincantes que le gène muté de l'uricase constitue le gène d'épargne. Ils ont d'abord déterminé la probable séquence d'ADN des gènes de l'uricase de primates disparus depuis longtemps ainsi que de mammifères tels que porcs, rats et chiens et leurs ancêtres communs. Par des méthodes de génie génétique, ils ont ensuite fait produire les enzymes correspondantes par des cellules hépatiques humaines. Ils ont ainsi montré que les uricases sont devenues de moins en moins actives au cours de l'évolution des hominoïdes, jusqu'à leur inactivation totale chez l'ancêtre commun des hominidés. Cette évolution génétique aurait conféré aux hominidés une meilleure capacité à stocker des graisses et à libérer du glucose pour alimenter le cerveau pendant les famines.

Notre hypothèse ne sera toutefois définitivement prouvée que le jour où l'on aura pu mener chez l'homme une série d'essais afin de faire baisser le taux d'acide urique. Comme on l'a vu plus haut, les essais pilotes réalisés jusqu'ici ont déjà montré qu'un médicament qui réduit le niveau

LES POPULATIONS

ayant conservé leur mode de subsistance traditionnel, tels les Yanomamis, en Amazonie brésilienne, ne souffrent guère d'obésité, de diabète de type 2 ou des maladies afférentes.

■ BIBLIOGRAPHIE

R. J. Johnson et P. Andrews, *Fructose, uricase, and the back-to-Africa hypothesis*, *Evolutionary Anthropology*, vol. 19(6), pp. 250-257, 2010.

J. T. Kratzer et al., *Evolutionary history and metabolic insights of ancient mammalian uricases*, *Proceedings of the National Academy of Sciences USA*, vol. 111(10), pp. 3763-3768, 2014.

R. J. Johnson, *The Fat Switch*, Mercola.com, 2012.

d'acide urique fait baisser la tension artérielle et la résistance à l'insuline, ralentit l'insuffisance rénale et prévient la prise de poids. Il reste à reproduire ces résultats à une échelle statistiquement suffisante.

Si le gène mutant de l'uricase est bien le gène d'épargne, alors la prévention de l'obésité, du diabète et des maladies cardiaques nécessitera d'abaisser les taux élevés d'acide urique, de cholestérol et de triglycérides. On pourrait même utiliser les nouvelles techniques de génie génétique pour améliorer dans l'organisme la synthèse de l'uricase humaine, et ainsi dégrader plus efficacement l'acide urique, au lieu de seulement l'évacuer par l'urine.

Réduire le sucre

En attendant, mieux vaut faire de l'exercice et adopter une alimentation plus saine afin d'éviter la prise de poids et les maladies afférentes. Le miel et le sucre blanc apportent tous deux du fructose et, pendant des milliers d'années, partout où des personnes aisées en ont consommé beaucoup, elles ont pris trop de poids et souvent souffert de la goutte. Au cours des dernières décennies, on a en outre ajouté de plus en plus de saccharose et de sirop de maïs ou de blé, riche en fructose, aux aliments transformés. Résultat : les prévalences de l'obésité et du diabète ont augmenté en flèche, de même que les niveaux moyens d'acide urique dans le sang.

En réduisant notre consommation de fructose et en le tirant essentiellement de fruits frais, qui contiennent aussi des substances telles que la vitamine C et des antioxydants susceptibles de neutraliser les effets du fructose et de l'acide urique, nous devrions pouvoir éviter de nombreuses maladies. Pour toutes ces raisons, l'association américaine de cardiologie a recommandé de réduire la consommation de sucre à 6 cuillerées à café par jour pour les femmes et à 9 cuillerées à café par jour pour les hommes. Des quantités inférieures seraient préférables !

Cinquante ans après les travaux pionniers de Neel, nous connaissons peut-être l'identité d'au moins un gène d'épargne et il semble qu'il joue un grand rôle dans les épidémies actuelles d'obésité et de diabète. Savoir épargner passe pour une vertu, mais dans le cas du métabolisme de notre organisme, cette capacité s'est retournée contre nous. ■

Le projet DES L'ÉNERGIE

Joshua Frieman

L'ESSENTIEL

- L'Univers est en expansion accélérée. La raison en est inconnue. L'une des hypothèses est l'existence d'une « énergie sombre ».
- Un nouveau projet, le relevé DES (*Dark Energy Survey*), vise à résoudre ce mystère en étudiant l'histoire de l'expansion cosmique.
- Le programme DES consiste à observer des supernovæ, les empreintes des ondes acoustiques primordiales, des amas de galaxies et des lentilles gravitationnelles.

© Redar HainyTerminab

à la poursuite de SOMBRE

Pourquoi l'expansion de l'Univers est-elle de plus en plus rapide ? Pour résoudre cette grande énigme de la cosmologie, les scientifiques plongent leur regard dans les confins du cosmos grâce à l'expérience *Dark Energy Survey*.

Il y a près d'un siècle, Edwin Hubble a découvert que l'Univers est en expansion: presque toutes les galaxies s'éloignent de la Voie lactée, et plus elles sont distantes, plus elles s'éloignent vite. Cette découverte fondamentale a été suivie en 1998 d'une autre, encore plus surprenante: cette expansion s'accélère.

Pendant la majeure partie du XX^e siècle, les chercheurs ont supposé que la gravité devait ralentir progressivement l'expansion. Pourtant, deux équipes d'astronomes étudiant les supernovæ (des explosions stellaires qui servent de référence pour mesurer les distances cosmiques) ont trouvé que la vitesse d'expansion de la structure d'espace-temps cosmique augmente. Cette découverte, confirmée depuis par d'autres observations, a été récompensée par le prix Nobel de physique en 2011. Mais

pourquoi donc l'Univers accélère-t-il ? Cette énigme est l'une des plus grandes de la science moderne.

Pour expliquer l'accélération cosmique, les cosmologistes ont proposé deux solutions. La première est qu'Albert Einstein n'avait pas eu le dernier mot sur la gravitation: bien que la gravité ait un effet attractif sur Terre et dans le Système solaire, peut-être agit-elle différemment, devenant une force répulsive, quand il s'agit des énormes distances de l'espace intergalactique. Dès lors, il faudrait modifier la théorie de la gravitation pour les échelles cosmiques.

La seconde idée est que l'Univers serait rempli de quelque chose d'invisible (que l'on nomme maintenant énergie sombre) qui contre la force de gravité et prend le dessus aux plus grandes échelles. Des mesures cosmiques indiquent que l'énergie sombre, si elle existe, constituerait aujourd'hui 70 % de la masse de l'Univers (la masse et l'énergie sont équivalentes, d'après la relation d'Einstein $E=mc^2$). Le reste de la masse de l'Univers est partagé entre la matière noire (une forme invisible de matière), à raison de 25 %, et la

matière ordinaire (constituées d'atomes, telles les étoiles, les planètes ou les gens), à raison de 5 % environ.

L'hypothèse de l'énergie sombre a reçu davantage d'attention que l'idée d'une gravité modifiée aux grandes échelles parce qu'elle explique mieux la formation des galaxies et des grandes structures de l'Univers et parce qu'elle est compatible avec toutes les mesures dont nous disposons.

Mais comment peut-on savoir avec certitude si l'énergie sombre est responsable de l'accélération cosmique ? Et si c'est bien l'énergie sombre, quelle en est exactement la nature ? Pour répondre à ces questions, mes collègues et moi, du Fermilab et de l'université de Chicago, avec quelque 300 autres physiciens et astronomes des États-Unis, d'Espagne, du Royaume-Uni, du Brésil, d'Allemagne et de Suisse, avons lancé il y a quelques années le projet d'observation astronomique DES (pour *Dark Energy Survey*, qui signifie « relevé de l'énergie sombre »).

Grâce à ce relevé, nous serons à même de reconstruire l'évolution de l'expansion cosmique au cours des quelque 14 milliards

L'INSTRUMENT DARK ENERGY CAMERA

a été installé sur le télescope *Víctor Blanco*, au Chili. Grâce à lui, les chercheurs pourront entre autres établir un catalogue de supernovæ (des explosions d'étoile), et évaluer les distances qui nous en séparent.

d'années de l'histoire de l'Univers. Et nous pourrions étudier la croissance des grandes structures (les vastes conglomerats de galaxies qui occupent l'Univers), ce qui nous permettra peut-être de trancher entre les différentes explications possibles de la dynamique d'expansion de l'Univers.

La collaboration a construit la *Dark Energy Camera*, qui constitue le cœur du projet. En 2012, nous avons monté cette caméra sur le télescope de quatre mètres *Victor Blanco* à l'Observatoire interaméricain du Cerro Tololo, installé sur les hauteurs des Andes chiliennes (voir la photographie page 50).

La caméra est conçue pour étudier avec rapidité de nombreux objets : des galaxies, des amas de galaxies et des supernovæ. Grâce à cinq grandes lentilles, cette caméra ultrasensible et dotée d'une résolution de 570 mégapixels a un très grand champ, qui lui permet de photographier de larges bandes du ciel en une pose.

La caméra a pris ses premiers clichés du ciel nocturne en septembre 2012 et le DES a officiellement entamé son relevé d'une large bande du ciel austral un an plus tard. Le relevé collectera les données d'août à février de chaque année pendant cinq ans et produira à terme une carte en haute résolution d'environ 200 millions de galaxies réparties sur un huitième du ciel, ainsi qu'un catalogue de supernovæ. Le relevé a d'ores et déjà recueilli une multitude de données qui sont en cours d'analyse.

L'un des objectifs du projet est de recueillir des indices qui permettront de départager les hypothèses sur l'origine de l'accélération de l'expansion cosmique : gravité modifiée ou énergie sombre, chacune existant sous différentes formes, ou scénarios. Pour le cas de l'énergie sombre, les physiciens vont mettre à l'épreuve deux idées : l'énergie du vide et la quintessence.

La première est assez paradoxale. Supposez que vous vidiez une boîte de tout son contenu (atomes, rayonnement, matière noire, etc.) et que rien ne puisse y pénétrer par les parois. L'intérieur de la boîte serait un vide parfait. D'après la physique classique, le vide (l'espace vide) n'a pas d'énergie. Mais la théorie quantique dit que même l'espace vide est porteur d'une certaine forme d'énergie. En effet, la théorie

autorise l'apparition spontanée de paires particule-antiparticule qui, après un bref instant, s'annihilent. Ainsi, le vide de la boîte n'est pas « vide » : il est à tout instant peuplé de ces particules, dites virtuelles, porteuses d'une énergie dont la forme correspond à celle requise pour constituer l'énergie sombre et entraîner l'accélération de l'expansion de l'Univers.

La seule difficulté avec cette idée est que, selon la physique quantique, la valeur de l'énergie du vide serait 120 ordres de grandeur (10^{120} fois) supérieure à ce qu'elle devrait être si elle constituait l'éner-

Le comportement de la particule de quintessence peut être comparé à celui d'une balle qui roule sur la pente d'une colline. L'énergie de cette balle est à la fois cinétique (en raison de son mouvement) et potentielle (à cause de la hauteur de la colline qu'elle descend) ; plus la balle se trouve en hauteur, plus son énergie potentielle est grande. Quand elle descend, son énergie potentielle diminue, et son énergie cinétique augmente. Si la particule de quintessence est extrêmement légère, alors elle descendrait très lentement aujourd'hui, avec relativement peu d'énergie cinétique par rapport à son énergie potentielle. Dans ce cas, les cosmologistes ont montré que son effet sur l'expansion cosmique serait similaire, à quelques détails près, à celui de l'énergie du vide et conduirait à une accélération.

Ce sont justement les détails, par lesquels se distinguent les différents scénarios, que les chercheurs du projet DES veulent mettre en évidence pour déterminer quelle explication est correcte. Pour trancher entre les causes possibles de l'accélération cosmique, les chercheurs explorent quatre phénomènes qui sont sensibles, et de façon différente, au rythme d'expansion de l'Univers. Comme les quatre phénomènes faisant office de sondes ne seront pas tous affectés de la même façon selon le scénario considéré (que ce soit l'énergie sombre – énergie du vide, quintessence – ou la gravité modifiée), il serait possible d'écarter les mauvaises pistes.

Ces quatre phénomènes sont les supernovæ, les traces des ondes acoustiques primordiales, les lentilles gravitationnelles et les amas de galaxies. Collectivement, ils nous renseignent sur la vitesse à laquelle l'Univers s'est dilaté et sur la quantité de matière qui s'est agrégée pour former les grandes structures aux différentes époques de l'histoire cosmique.

Dans l'Univers primordial, la densité de matière était assez importante pour former les grandes structures. Environ 7 milliards d'années après le Big Bang, la matière s'est tant diluée que le responsable de l'expansion cosmique accélérée a commencé à faire son œuvre et à empêcher la formation de grandes structures de se poursuivre.

Le relevé *Dark Energy Survey*

produira une carte en haute résolution d'environ 200 millions de galaxies réparties sur un huitième du ciel

gie sombre. Si les physiciens ne peuvent ignorer ce problème, ils utilisent malgré tout l'idée de l'énergie du vide comme banc d'essai pour mettre à l'épreuve les données observationnelles sur l'Univers.

Pour régler ce problème d'ordres de grandeur trop différents, les chercheurs ont proposé d'autres explications que l'énergie du vide. Une piste est celle d'un champ quantique, nommé quintessence, présent en tout point de l'espace. Ce champ a de nombreux points communs avec le champ de Higgs, associé au boson de Higgs, la particule découverte en 2012 au LHC (le Grand collisionneur de hadrons), au Cern. La particule associée à la quintessence aurait, comme le boson de Higgs, un spin (moment cinétique intrinsèque) nul, mais elle serait plus légère d'environ 44 ordres de grandeur.

Comme nous l'avons mentionné, les supernovæ ont eu un rôle primordial dans la découverte de l'expansion accélérée de l'Univers. Il s'agissait plus précisément de supernovæ de type Ia. Ces explosions stellaires se produisent quand une petite étoile dense, une naine blanche, accumule de la matière et atteint une certaine masse limite. Ces supernovæ ont une caractéristique très utile: la variation au cours du temps de la luminosité est la même pour toutes.

Pour un observateur sur Terre, toute différence dans la courbe de luminosité est ainsi uniquement due à la distance de la supernova: plus elles sont pâles, plus elles sont lointaines. Il est donc possible de déterminer la distance de la supernova. C'est pourquoi on parle de «chandelle standard». Nous savons par exemple qu'une supernova de type Ia 100 fois plus pâle qu'une autre est 10 fois plus lointaine.

Des chandelles étalons dans l'Univers

Le relevé DES examine à intervalles de quelques nuits les mêmes régions du ciel afin de mesurer les distances précises de quelques milliers de supernovæ de type Ia dans l'Univers proche et lointain. Cela représente près de 100 fois plus d'objets qu'on n'en a utilisé en 1998 pour mettre en évidence la dynamique accélérée de l'Univers.

Mais la distance est insuffisante pour déterminer le rythme d'expansion cosmique. Nous utilisons d'autres télescopes pour mesurer le décalage spectral des émissions électromagnétiques de ces supernovæ. En effet, lorsqu'un objet s'éloigne d'un observateur, la longueur d'onde lumineuse mesurée par ce dernier est supérieure à la longueur d'onde émise: c'est l'effet Doppler. Le spectre d'émission apparaît donc décalé vers le rouge. Dans le cas des supernovæ, ce décalage est dû à l'expansion de l'Univers entre le moment de l'émission de l'onde et sa réception par nos télescopes. En combinant nos données sur la distance à laquelle se trouvent les supernovæ et leur vitesse d'éloignement, nous pourrions reconstruire avec précision l'histoire des 10 derniers milliards d'années d'expansion de l'Univers.

Une telle mesure permet de départager les théories de l'accélération cosmique parce que chacune d'elles prédit une expansion au déroulement légèrement différent. Si par exemple c'est la quintessence qui est à l'œuvre, l'expansion accélérée aurait débuté

un peu plus tardivement que dans le scénario de l'énergie du vide et elle se serait intensifiée plus progressivement. Ainsi, les supernovæ présentant un décalage vers le rouge donné sembleront plus brillantes (car elles sont plus proches) si l'énergie sombre est sous la forme de quintessence plutôt que d'énergie du vide. Et dans l'hypothèse où la gravité ne se comporte pas, aux grandes distances, conformément à la théorie de la relativité générale, le motif pour les supernovæ lointaines sera encore différent, bien que les détails varient selon les modèles imaginés par les chercheurs.

Ces mesures doivent être précises pour départager les modèles car les différences qu'ils prévoient restent assez faibles. Par conséquent, nous souhaitons connaître la relation entre distance et décalage vers le rouge avec une précision de l'ordre de 1 %, un exploit que la caméra *Dark Energy Camera* devrait être la première à réaliser.

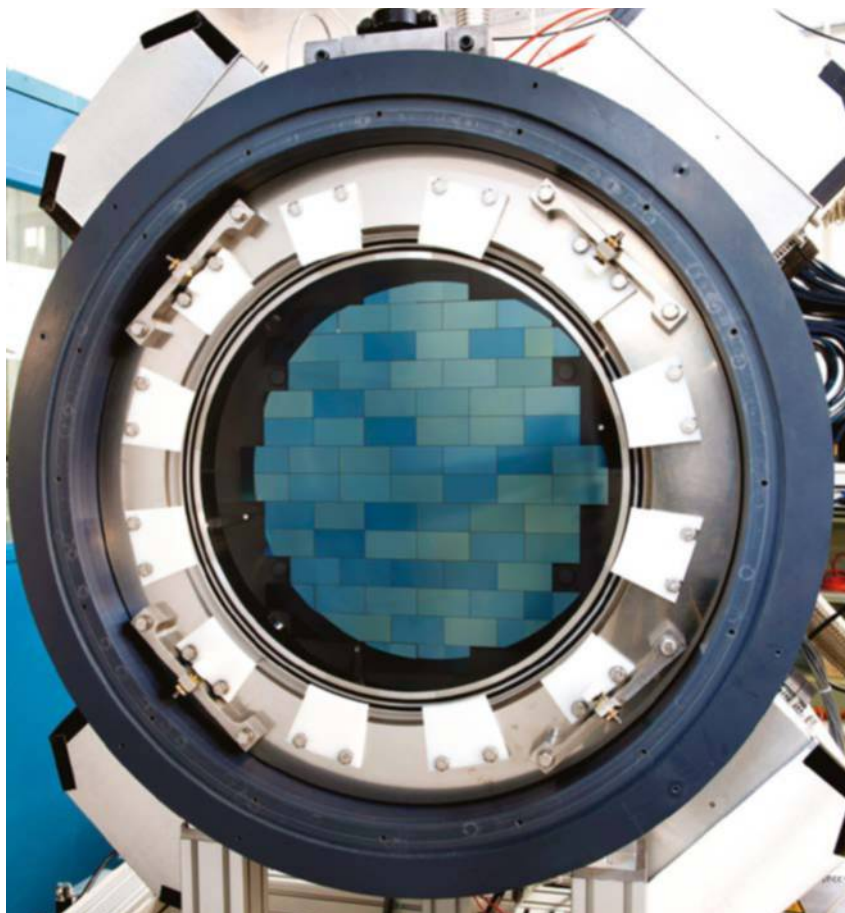
Le relevé DES utilisera aussi un vestige des conditions régnant dans l'Univers

■ L'AUTEUR



Joshua FRIEMAN est cosmologiste et directeur du programme DES (*Dark Energy Survey*).

Il est directeur de recherche au Fermilab, aux États-Unis, et professeur d'astronomie et d'astrophysique à l'institut Kavli de physique cosmologique, à l'université de Chicago.



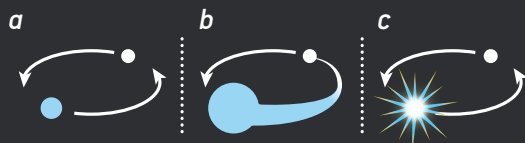
LA CAMÉRA DU PROGRAMME DARK ENERGY SURVEY comporte 74 capteurs CCD au silicium. Ils permettent à cet instrument de couvrir un champ relativement grand du ciel avec une résolution de 570 mégapixels.

© Reidar Hahn/Fermilab

QUATRE MÉTHODES POUR ÉTUDIER L'ACCÉLÉRATION COSMIQUE

La vitesse d'expansion de l'Univers augmente depuis 7 milliards d'années. Le relevé DES (*Dark Energy Survey*) vise à comprendre la cause de ce phénomène par l'examen de quatre types de signaux. Les deux présentés ci-dessous à gauche permettent de mesurer des distances indiquant quelle était la taille de l'Univers et à quel rythme il se dilatait à différentes époques. Les deux de droite permettent de cartographier l'hétérogénéité de la matière dans l'espace, afin d'évaluer la com-

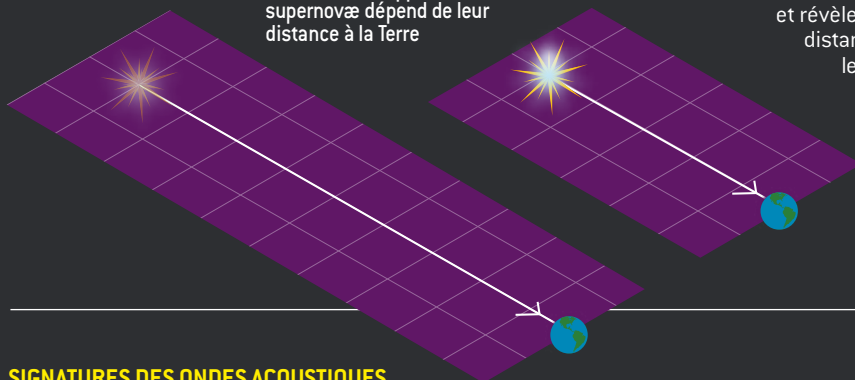
pétition entre la gravitation et la force responsable de l'accélération de l'expansion de l'Univers. Certains motifs d'expansion et de structuration de la toile cosmique au fil du temps suggèrent que l'accélération découle d'une « énergie sombre », une composante hypothétique de l'Univers. Une autre piste pour expliquer l'accélération, en lien avec certaines observations, est d'envisager une modification des lois de la gravitation aux échelles cosmiques.



LUMINOSITÉ DES SUPERNOVÆ DE TYPE Ia

Ces explosions stellaires sont le fait d'un type particulier d'étoiles denses, les naines blanches. Selon un scénario possible, la naine blanche forme un système binaire avec une étoile compagnon (a), dont elle absorbe de la matière (b) jusqu'à atteindre une certaine limite de masse, déclenchant une supernova (c). Comme toutes les supernovæ de type Ia produisent presque la même quantité de matériau radioactif, leur luminosité intrinsèque (qui dépend de ce matériau) est pratiquement toujours la même. Par conséquent, leur luminosité apparente ne dépend que de leur distance et révèle donc leur éloignement. La comparaison des distances des supernovæ avec leur décalage vers le rouge (qui indique la vitesse à laquelle elles s'éloignent de nous) révèle la vitesse d'expansion de l'Univers aux différentes époques cosmiques.

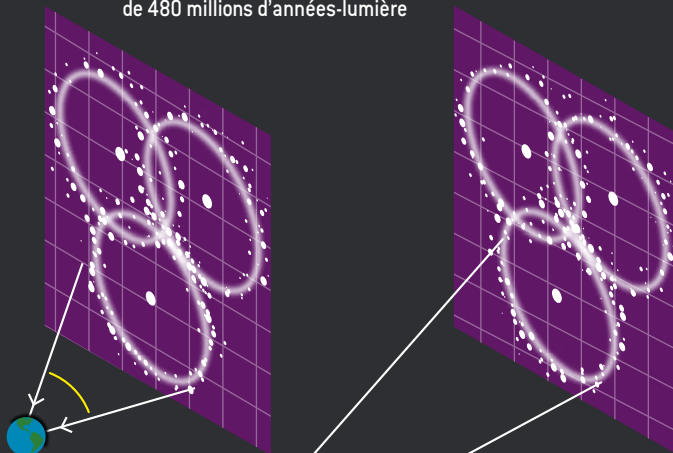
La luminosité apparente des supernovæ dépend de leur distance à la Terre



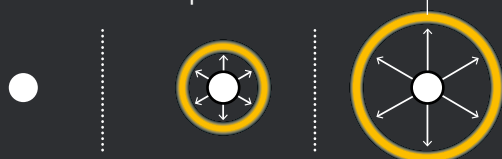
SIGNATURES DES ONDES ACOUSTIQUES

Les ondes de densité émises dans l'Univers primordial se sont propagées dans l'espace à une vitesse proche de celle de la lumière jusqu'à ce que le cosmos soit suffisamment refroidi pour former des atomes. La distance couverte par les ondes jusqu'à ce point (qui correspond à 480 millions d'années-lumière aujourd'hui) a pour conséquence qu'il est légèrement plus probable pour deux galaxies de s'être formées dans des régions de surdensité séparées par cette distance. Statistiquement, on observe une légère surpopulation de galaxies dans une zone en forme d'anneau d'un rayon de 480 millions d'années-lumière autour d'une galaxie donnée. Puisque les astronomes connaissent le rayon absolu de l'anneau, ils peuvent mesurer l'angle que l'anneau couvre sur le ciel pour en déduire la distance des galaxies : plus elles sont lointaines, plus l'angle est petit. Ces distances, ensuite comparées aux décalages vers le rouge des galaxies, permettent d'établir l'histoire de l'expansion de l'Univers.

Around d'une galaxie donnée, on observe un léger excès de galaxies à une distance de 480 millions d'années-lumière



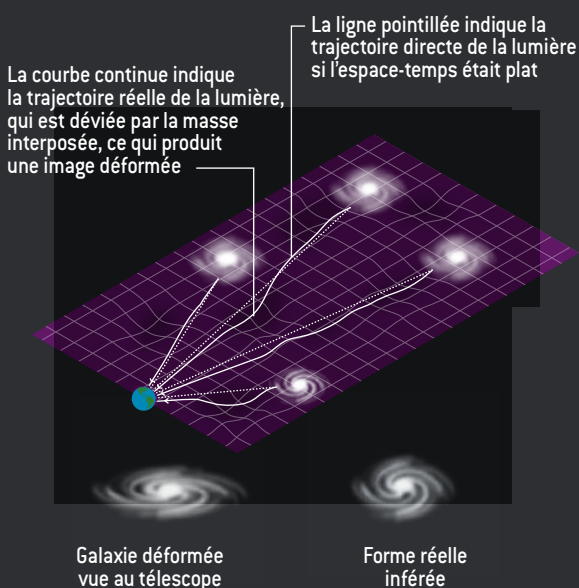
Les ondes acoustiques se propagent sur 480 millions d'années-lumière dans l'Univers primordial



Les anneaux de galaxies plus lointains couvrent un angle plus petit sur le ciel

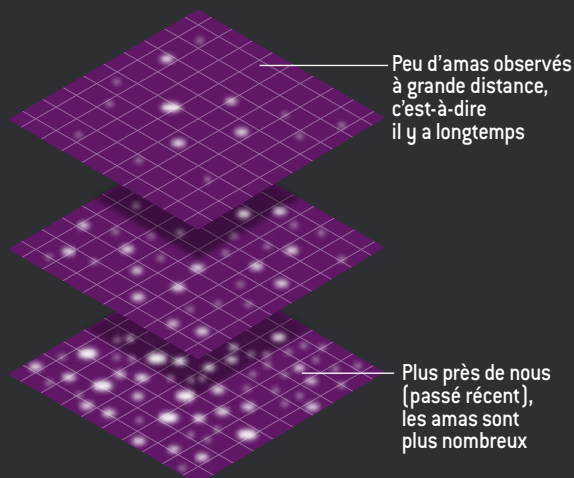
LES LENTILLES GRAVITATIONNELLES

La lumière des galaxies lointaines est déviée quand elle passe à côté d'objets massifs (tels les amas de galaxies) lors de son trajet vers l'observateur. À cause de cet effet dit de lentille gravitationnelle, l'image des galaxies lointaines apparaît déformée au télescope. L'expérience DES mesurera les légères distorsions de nombreuses galaxies pour en déduire une carte de la répartition de la masse dans l'Univers. Cela permettra de mettre en évidence l'hétérogénéité de la matière aux différentes époques cosmiques.



LES AMAS DE GALAXIES

Au cours du temps, la gravité rassemble les galaxies en amas, malgré l'effet opposé de l'énergie sombre. Le relevé DES traquera des dizaines de milliers d'amas situés jusqu'à plusieurs milliards d'années-lumière de nous pour comparer le nombre d'amas observés dans un passé récent et plus ancien. Cela nous renseignera sur le rythme auquel les galaxies se sont regroupées.



primordial pour étudier l'histoire de son expansion : les oscillations acoustiques des baryons (les baryons sont la famille de particules à laquelle appartiennent les protons et les neutrons, qui composent les noyaux atomiques). L'Univers jeune était rempli d'un plasma de matière ionisée (noyaux atomiques et électrons) et de photons en interaction. Deux forces s'opposaient. La gravité tendait à agglomérer la matière dans des zones de surdensité, tandis que la lumière prisonnière exerçait une pression qui s'y opposait. Cette concurrence a engendré dans le plasma des vibrations, comparables à des ondes sonores. Celles-ci ont formé des zones plus ou moins denses de matière qui suivent une distribution particulière, que l'on nomme oscillations acoustiques des baryons.

Vers 380 000 ans après le Big Bang, la matière s'est assez refroidie pour que les noyaux atomiques et les électrons se combinent et forment des atomes neutres. La lumière interagissant alors peu avec la matière, l'opposition des forces a pris fin. La distance parcourue par les ondes acoustiques jusqu'à cet instant correspond aujourd'hui à une échelle d'environ 480 millions d'années-lumière. Les astronomes la retrouvent imprimée dans la répartition spatiale des galaxies sous la forme d'une légère tendance statistique des galaxies à être séparées de cette distance typique plutôt que d'une autre.

Cette échelle des oscillations acoustiques des baryons fournit un étalon de distance qui peut être mesuré à différentes époques dans l'histoire de l'Univers. Le relevé DES mesurera cette caractéristique des oscillations acoustiques des baryons à partir d'un catalogue d'environ 200 millions de galaxies. Cela nous permettra de déterminer leurs distances et d'associer cette donnée à leurs décalages vers le rouge, de la même façon que pour les supernovæ. Les galaxies présentant un même décalage vers le rouge seraient plus proches si la quintessence, qui a entraîné un début d'accélération plus tardif, est en jeu, en comparaison avec le scénario où l'énergie du vide serait responsable et où l'accélération aurait commencé plus tôt.

Des galaxies déformées

Quant à la méthode des lentilles gravitationnelles, elle repose sur une propriété de la lumière prédite par la théorie de la relativité générale d'Einstein. Lors de leur trajet jusqu'à nous, les rayons lumineux en provenance de lointaines galaxies sont courbés par le champ gravitationnel de la matière à proximité de laquelle ils passent. Cette courbure conduit à une distorsion des images des galaxies : c'est l'effet de lentille gravitationnelle. Quand la courbure est importante, les images résultantes sont spectaculaires : des galaxies lointaines présentent l'apparence d'arcs de lumière longs et fins, et l'on peut même voir plusieurs images d'une même galaxie. Mais les rayons lumineux de la plupart des galaxies ne sont que légèrement courbés, et ces très petites distorsions ne sont pas détectables à l'œil nu : c'est le régime des lentilles gravitationnelles faibles.

BOSS voit l'Univers en trois dimensions

Une équipe d'une centaine de physiciens et d'astronomes a annoncé en juillet 2016 les derniers résultats du plus grand relevé spectrométrique actuel de galaxies, le sondage BOSS (Baryon Oscillation Spectroscopic Survey).

Ce relevé fait partie du programme *Sloan Digital Sky Survey III* (SDSS-III), auquel participent le CNRS et le CEA en France. Il a permis de dresser une carte tridimensionnelle de 1,2 million de galaxies sur plus d'un quart du ciel. Les chercheurs ont alors utilisé cette carte pour effectuer des mesures très précises de l'énergie sombre censée régir l'accélération de l'expansion de l'Univers.

Pour cela, BOSS compare l'échelle des ondes de densité ou pression primordiales que l'on observe dans le fond diffus cosmologique émis 380 000 ans après le Big Bang à celles qui influent, 7 à 12 milliards d'années plus tard, sur la répartition spatiale des galaxies (les oscillations acoustiques baryoniques, ou BAO, nées de l'opposition entre la gravité, qui fait s'effondrer la matière sur elle-même, et la pression radiative des photons).

Le relevé DES étudie aussi les BAO, mais il s'agit d'un relevé photométrique, tandis que BOSS est un relevé spectrométrique.

La précision inégalée de BOSS sur les mesures de distance est obtenue grâce à un spectrographe composé de 1000 fibres optiques installées sur le télescope SDSS de 2,5 mètres à l'observatoire d'Apache Point, au Nouveau-Mexique, aux États-Unis. Il a fallu près de 2000 nuits d'observation pour mesurer l'ensemble

des spectres des galaxies : la lumière de chaque galaxie passe, via une fibre, à travers un spectrographe, lequel décompose la lumière en différentes longueurs d'onde, à l'instar d'un prisme, qui sépare la lumière selon les couleurs de l'arc-en-ciel.

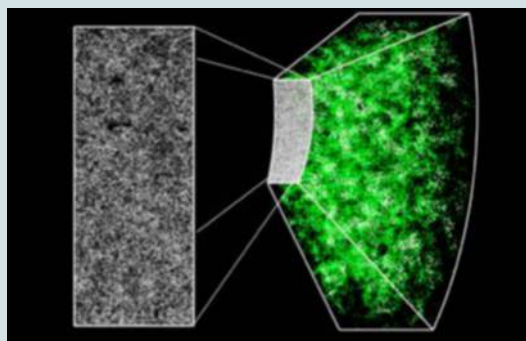
La carte établie par BOSS permet de mesurer la vitesse d'expansion de l'Univers et de déterminer ainsi la quantité de matière et d'énergie noire. Cette carte met aussi en évidence la signature des mouvements cohérents des galaxies vers des régions plus denses de matière, telle qu'attendue dans le cadre de la théorie de la relativité générale. Ces mesures confortent la description d'un Univers spatialement plat contenant un fluide cosmique assimilable à une constante cosmologique, correspondant à l'énergie du vide.

Cependant, les incertitudes sur les mesures ne permettent pas d'écarter d'autres possibilités pour

l'énergie sombre. Et il est probable qu'il faille attendre la prochaine génération de sondages de galaxies pour que les résultats soient sensibles à des extensions du modèle standard de la cosmologie et pour distinguer une éventuelle déviation de la théorie qui décrit les lois de la gravitation aux très grandes échelles.

La France joue un rôle majeur dans les deux grands futurs programmes de cosmologie prévus pour 2020 : le *Large Synoptic Survey Telescope*, télescope au sol de 8 mètres qui sera installé au Chili, et la mission spatiale *Euclid*, qui sera mise en orbite. Cette dernière, conçue par l'Agence spatiale européenne, permettra d'étudier l'Univers sombre grâce à sa spectroscopie ultraprecise, et de tester les différents scénarios de l'énergie sombre en combinant la signature des ondes sonores primordiales avec les lentilles gravitationnelles. L'enjeu du projet *Euclid*, qui regroupe déjà plus d'un millier de chercheurs, est de taille : comprendre 95 % du contenu en énergie de l'Univers !

– **Stéphanie Escoffier**
CPPM, CNRS/université
Aix-Marseille



LE RELEVÉ BOSS a déterminé la position dans l'Univers de près de un million de galaxies (en vert). Cette carte permet d'étudier l'expansion cosmique.

Cet effet est sensible à toute la matière présente, donc principalement à la matière noire, et est un peu moins sensible à la matière ordinaire, composée de baryons. Cette approche est donc très complémentaire de celle fondée sur les oscillations acoustiques de baryons.

En mesurant les formes de nombreuses galaxies sur une petite portion du ciel, on détermine dans quelle mesure les images ont été déformées et on établit ainsi une carte de la matière interposée. En répétant cela dans différentes parties du ciel, on met en évidence la répartition générale hétérogène de la matière dans l'Univers (voir l'encadré ci-contre). L'évolution de cette granulosité au fil du temps, parce qu'elle reflète la compétition entre la gravité et l'énergie sombre, peut aider à déterminer l'origine de l'accélération de l'Univers.

Le relevé DES mesurera la forme de 200 millions de galaxies pour observer cet effet, couvrant ainsi 20 fois plus de galaxies et une plus grande portion du ciel que les précédentes études de lentilles gravitationnelles faibles. La carte obtenue pour diverses régions et à différentes distances de la Terre (donc à différentes époques cosmiques, car plus un objet est lointain, plus la lumière de cet objet met de temps à nous parvenir) dépendrait des facteurs en jeu dans l'expansion de l'Univers. Les simulations montrent que la quintessence entrave plus la formation de grandes structures que l'énergie du vide, par exemple. Connaissant le degré d'hétérogénéité actuel, il s'ensuit que l'Univers jeune devait contenir plus d'hétérogénéité dans l'hypothèse de la quintessence que dans celle de l'énergie du vide.

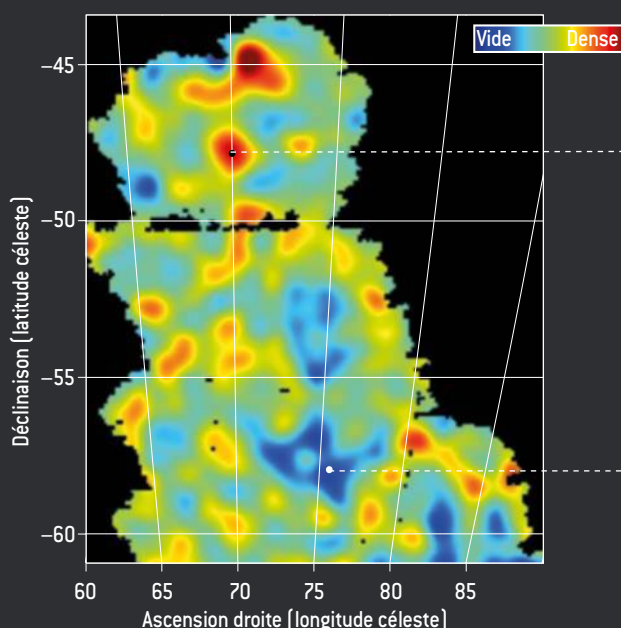
Enfin, le relevé DES traquera les amas de galaxies pour reconstituer d'une autre façon l'évolution de l'hétérogénéité cosmique au fil du temps. Les amas, dont les masses peuvent atteindre plus de 10^{15} fois celle du Soleil, sont les plus gros objets de l'Univers liés par la gravitation. Par rapport aux précédents relevés cosmologiques des amas, qui ont couvert des régions du ciel plus petites, le relevé DES devrait découvrir des dizaines de milliers d'amas situés jusqu'à plusieurs milliards d'années-lumière de nous.

Les cosmologistes compareront alors le nombre d'amas présents près de la Terre (correspondant à l'époque récente) et loin dans le passé. Comme pour les effets de l'hétérogénéité de la matière mis en évidence par les lentilles gravitationnelles faibles, nous nous attendons à voir

CARTOGRAPHIE DE LA MATIÈRE COSMIQUE

La carte ci-dessous montre la répartition à grande échelle de la matière sur environ 139 degrés carrés du ciel, une zone correspondant à 650 fois la taille angulaire de la pleine lune. Les régions en rouge sont des zones où la densité de matière est supérieure à la moyenne, tandis que le bleu représente des zones moins denses. Cette carte résulte des données du relevé DES sur les lentilles gravitationnelles faibles (la légère déformation de l'image d'une galaxie provoquée

par la déviation des rayons lumineux lors de leur passage à proximité d'objets massifs tels que des amas de galaxies, contenant de la matière ordinaire et de la matière noire). Les photographies en médaillon, prises par l'instrument *Dark Energy Camera*, montrent une région de surdensité (avec un grand nombre de galaxies brillantes) et une zone où apparaissent relativement peu de galaxies, conformément à la densité comparativement faible de la région.



© J. Zuntz, M. Troxel et la collaboration DES

d'avantage d'amas dans l'Univers jeune si c'est la quintessence, plutôt que l'énergie du vide, qui est à l'œuvre. Et nous devrions observer une tendance fort différente et plus compliquée dans l'hypothèse d'une gravité modifiée.

Une riche moisson

Depuis son lancement officiel en août 2013, le relevé DES a couvert près de 5000 degrés carrés du ciel et a livré des images d'une centaine de millions de galaxies. Quant aux supernovæ, plus de 1000 de type Ia ont été relevées. Nous entamons l'analyse de ces données pour déterminer les distances de ces supernovæ et les relier à leur décalage vers le rouge. Nous mesurons aussi les formes des galaxies pour déduire le signal de lentille gravitationnelle faible, la distribution spatiale des galaxies pour traquer la signature des oscillations acoustiques des baryons et la répartition des amas de galaxies. D'ici à la fin de cette année, la première phase de

cette analyse sera à peu près achevée. Nous pourrons alors commencer à chercher des indices sur l'expansion de l'Univers.

En attendant, l'expérience a déjà donné des résultats intéressants et d'une tout autre nature, telle la découverte à confirmer de 16 galaxies naines ultrapâles dans le voisinage de la Voie lactée. Ces galaxies très proches ne contiennent, pour certaines, pas plus de quelques dizaines d'étoiles et sont parmi les objets les plus riches en matière noire que l'on connaisse. Peu lumineuses, leur détection est difficile, mais elles sont cruciales pour comprendre la formation des galaxies telles que la Voie lactée.

De nouvelles données de DES arrivent sans cesse. Nous ne savons pas encore si le relevé DES apportera des réponses définitives sur les causes de l'expansion accélérée de l'Univers – l'énergie du vide, la quintessence, une autre forme d'énergie sombre ou la gravité modifiée – mais nous savons qu'il nous fera franchir un grand pas vers la résolution de cette énigme. ■

■ BIBLIOGRAPHIE

S. Alam *et al.*, The clustering of galaxies in the completed SDSS-III baryon oscillation spectroscopic survey: Cosmological analysis of the DR12 galaxy sample, <https://arxiv.org/abs/1607.03155>, 2016.

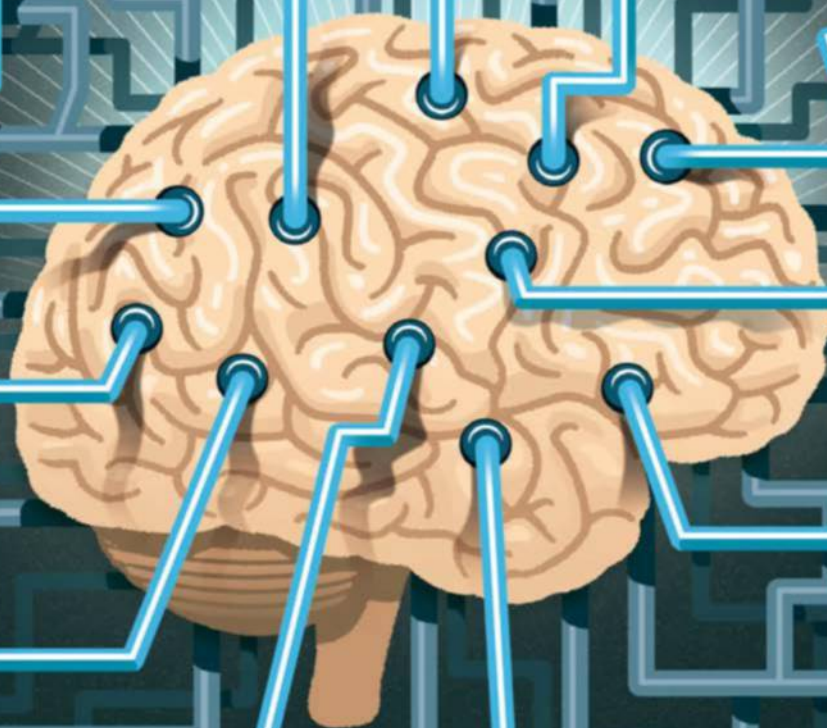
K. Bechtol *et al.*, Eight new Milky Way companions discovered in first-year Dark Energy Survey data, *Astrophysical Journal*, vol. 807, article 50, 2015.

C. Chang *et al.*, Wide-field weak lensing mass maps from Dark Energy Survey science verification data, *Phys. Rev. Lett.*, vol. 115, 051301, 2015.

C. Deffayet, Énergie sombre ou nouvelle gravitation ?, *Pour la Science*, n° 443, septembre 2014.

G. Börner, L'énergie sombre et ses alternatives, *Dossier Pour la Science*, n° 71, avril-juin 2011.

Comment le cerveau



évacue ses déchets

Maiken Nedergaard et Steven Goldman

Comme tous les organes en activité, le cerveau produit des déchets et toxines dont il doit se débarrasser. Pour la première fois, des observations ont révélé comment ce nettoyage s'effectue.

Le cerveau humain pèse environ 1,4 kilogramme, soit 2 % de la masse corporelle moyenne d'un adulte. Cependant, ses cellules consomment 20 à 25 % de l'énergie totale du corps et produisent des quantités importantes de déchets potentiellement toxiques : l'équivalent du poids du cerveau lui-même en un an ! Impossible d'imaginer que cet organe, qui dicte nos actions et nos pensées, s'encombre de tant de déchets. Mais alors, comment fait-il le vide ? Gère-t-il lui-même ses détritiques ? Ou s'en débarrasse-t-il auprès d'un autre organe plus spécialisé dans ce type de tâche, tel le foie, qui est une véritable usine à supprimer ou recycler les déchets ? Tout cela est resté mystérieux jusqu'à nos premières études sur la souris en 2012, qui ont apporté la preuve de l'existence d'un système d'évacuation des déchets propre au cerveau. Depuis, nous avons montré que ce rituel d'épuration s'accomplit durant le sommeil.

Dans la plupart des organes de notre corps, les déchets sont éliminés grâce au système lymphatique. Ce réseau de vaisseaux, différent de celui de la circulation sanguine, transporte un liquide chargé de nutriments et de cellules immunitaires, la lymphe. Celle-ci s'écoule d'abord dans

des petits canaux, qui confluent ensuite pour donner naissance à de plus grands et débouchent finalement dans des vaisseaux sanguins. Cette structure vasculaire procure une voie de défense immunitaire, car des ganglions lymphatiques, réservoirs de globules blancs qui permettent de lutter contre les infections, sont répartis en des points stratégiques le long des canaux. Ce système est présent dans tout le corps, mais on a longtemps pensé que le cerveau en était dépourvu et éliminait lui-même ses déchets.

Un système « glymphatique »

Or le cerveau contient lui aussi un réseau de canaux étroitement lié à la circulation sanguine. Chaque vaisseau sanguin cérébral est entouré d'un espace, dit périvasculaire, qui forme une sorte de tunnel. Cependant, si sa structure fait penser au système lymphatique, ce réseau est bel et bien spécifique au cerveau : la paroi externe des canaux est en effet recouverte par les extensions de certaines cellules nommées astrocytes, qui remplissent une multitude de fonctions dans le système nerveux central. Ces

L'ESSENTIEL

- Des recherches récentes ont permis de découvrir dans le cerveau des voies de passage pour l'élimination des détritiques.
- Ce système de drainage cérébral est surtout actif durant le sommeil.
- Son dysfonctionnement favorise peut-être l'apparition de certaines maladies neurodégénératives, telles celles d'Alzheimer ou de Parkinson, liées à l'accumulation de protéines toxiques dans le cerveau.

Peter Hoey

extensions (pieds astrocytaires) entourent complètement les artères, les capillaires et les veines dans le cerveau et la moelle épinière. Du liquide ne pourrait-il pas circuler dans ces canaux ?

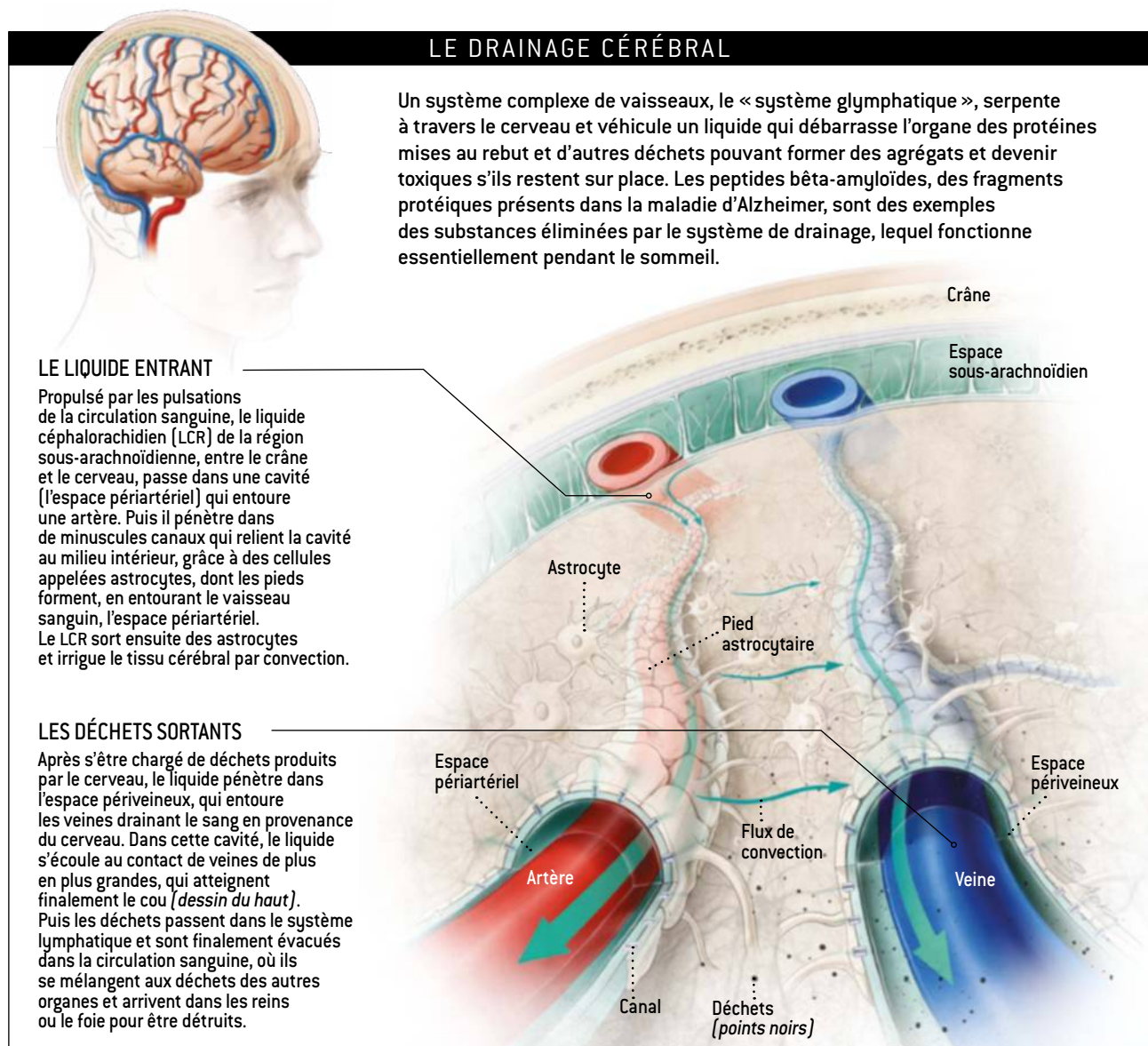
La neurophysiologiste américaine Patricia Grady en a apporté pour la première fois la preuve il y a vingt ans : travaillant alors à l'université du Maryland, elle a montré que des protéines injectées dans le liquide céphalorachidien (LCR, le liquide à base d'eau qui baigne le cerveau et la moelle épinière) de cerveaux de chiens ou de chats se retrouvaient dans les espaces périvasculaires. Cela suggérait que du LCR circule dans ces canaux. Mais à l'époque, ces expériences n'ont pu être reproduites par d'autres équipes et les recherches ont été abandonnées.

Il y a quelques années, lorsque nous avons commencé à travailler sur le système d'évacuation des déchets du cerveau, la question a resurgi : s'il sert de transport au LCR, ce réseau de canaux ne pourrait-il pas fonctionner à la façon du système lymphatique ? Pour répondre à cette question, il fallait pouvoir visualiser le chemin emprunté par le LCR dans le cerveau. C'est ce que nous avons fait, avec Jeff Iliff et Rashid Deane, membres de notre laboratoire. Grâce à une technique d'imagerie particulière, la microscopie à deux photons, nous avons pu suivre en direct les flux de LCR et de sang dans le cerveau de souris.

Ce que nous avons vu confirme l'existence d'un système de drainage cérébral.

Les battements artériels propulsent effectivement de grandes quantités de LCR dans les espaces périvasculaires. En utilisant les astrocytes comme conduits, le liquide irrigue ensuite le tissu cérébral. Après s'être chargé de déchets, il entre dans l'espace périveineux, qui entoure un réseau de veines. Il passe ainsi au contact de veines de plus en plus grandes, qui atteignent finalement le cou. Les déchets entrent ensuite dans le système lymphatique puis dans la circulation sanguine, où ils se mélangent à ceux des autres organes et arrivent finalement dans les reins ou le foie.

Nous avons nommé «système glymphatique» ce mécanisme d'évacuation des déchets cérébraux, car il s'appuie sur les cellules



gliales (dont les astrocytes sont un exemple) et fait penser au système lymphatique.

On sait que dans diverses pathologies du cerveau (par exemple, dans les maladies d'Alzheimer ou de Parkinson), des protéines s'accumulent jusqu'à former des agrégats qui entravent la transmission des signaux électriques et chimiques dans le cerveau et contribuent au processus pathologique. Ce phénomène ne pourrait-il pas être dû à une défaillance du système de drainage ? Cela signifierait que dans les cerveaux sains, les protéines sont bien éliminées par ce tout-à-l'égout cérébral.

Un lien avec les maladies neurodégénératives

C'est le cas : nous l'avons vérifié avec la protéine bêta-amyloïde (que nous avons suivie avec un marqueur fluorescent dans les cerveaux de souris), dont les agrégats sous forme de plaques jouent un rôle dans la maladie d'Alzheimer. En outre, des souris dont le système de drainage cérébral avait été rendu moins performant par génie

■ LES AUTEURS



Maiken NEDERGAARD est neurobiologiste à l'université de Copenhague, au Danemark, et au Centre médical de l'université de Rochester, aux États-Unis.



Steven A. GOLDMAN est professeur de neurosciences et de neurologie aux universités de Rochester et de Copenhague.

génétique (voir l'encadré page précédente) ont beaucoup plus de mal à éliminer ce peptide de leur cerveau. D'autres protéines impliquées dans des maladies neurodégénératives, telles que les synucléines dans la maladie de Parkinson, la maladie à corps de Lewy et l'atrophie multisystématisée, seraient peut-être aussi évacuées par le système glymphatique et s'accumuleraient anormalement s'il ne fonctionnait pas bien. D'ailleurs, est-ce que ce lavage du cerveau s'effectue 24 heures sur 24 ? La réponse nous est venue en observant des patients souffrant de la maladie d'Alzheimer.

Un grand nombre de malades d'Alzheimer souffrent de troubles du sommeil longtemps avant que leur démence ne se manifeste. Ce mauvais sommeil contribue-t-il au processus pathologique ? Plusieurs expériences le montrent. Si l'on force des personnes en bonne santé à rester éveillées, elles présentent des symptômes caractéristiques d'une maladie neurologique ou mentale : outre divers problèmes de concentration, trous de mémoire, fatigue, irritabilité, sautes d'humeur, le manque de sommeil

Direction de l'innovation et des relations avec les entreprises

Organisme de formation continue

cnrs
formation
entreprises

→ 200 formations technologiques courtes proposées par le CNRS sur ses plateformes de recherche pour les ingénieurs et les techniciens

→ Domaines de formation

Big data, robotique, énergie, matériaux, biologie, microscopie, spectrométrie, RMN... et plus encore

+ de 1100 stagiaires formés chaque année



Découvrez nos stages sur
cnrsformation.cnrs.fr



contact : cfe.contact@cnrs.fr ou +33 (0)1 69 82 44 55

🐦 @CNRS_CFE

profond peut provoquer de la confusion, des hallucinations, des crises d'épilepsie, voire conduire à la mort. Lorsqu'ils sont privés de sommeil, des animaux de laboratoire meurent parfois en quelques jours et les humains ne sont guère plus résistants. Chez ces derniers, l'insomnie familiale fatale est une maladie héréditaire qui entraîne une réduction progressive du sommeil jusqu'à la mort, qui survient généralement dans les dix-huit mois qui suivent le diagnostic. Des études épidémiologiques ont également montré que des personnes ayant eu un sommeil perturbé à un âge moyen présentaient un risque de déclin cognitif plus élevé que les sujets témoins lorsqu'elles étaient soumises à des tests vingt-cinq ans plus tard. On le voit, le sommeil a donc un impact très net sur le fonctionnement du cerveau. Mais alors, est-ce vrai aussi pour sa fonction d'autonettoyage ?

Toutes nos expériences – c'est-à-dire le suivi des flux de liquide céphalorachidien par microscopie à deux photons – ayant été menées sur des souris anesthésiées, nous les avons répétées sur des souris éveillées et endormies afin de comparer les résultats. Pour ce faire, il a fallu entraîner les animaux à rester immobiles sous un microscope... L'imagerie n'étant ni invasive ni douloureuse, la plupart des souris sont restées tranquilles et dociles, au point que certaines se sont endormies pendant l'acquisition d'images. Cela nous a permis de visualiser l'afflux de LCR dans le cerveau d'une même souris à la fois pendant le sommeil et l'état de veille. Résultat : la quantité de LCR dans le système glymphatique baisse considérablement lorsque les souris sont éveillées, et augmente de façon significative dès qu'elles s'endorment. En outre, l'évacuation de la protéine bêta-amyloïde est deux fois plus efficace chez les souris endormies.

Ce tout-à-l'égout cérébral semble donc surtout actif pendant le sommeil. Mais pourquoi ? Avec Charles Nicholson, de l'université de New York, nous avons montré que l'espace entre les cellules cérébrales (dit interstitiel) s'élargit de plus de 50 % quand les souris s'endorment, ce qui facilite la propulsion de liquide à travers le tissu cérébral. Cet élargissement est en

Dans le cerveau sain, le système glymphatique élimine des protéines associées aux maladies d'Alzheimer, de Parkinson et d'autres troubles neurologiques

L'aquaporine, bouche d'égout moléculaire

Les astrocytes jouent un rôle clé dans la circulation du liquide céphalorachidien grâce à une protéine, l'aquaporine-4, contenue dans leurs prolongements (pieds) et qui assure le passage du liquide. Chez des souris génétiquement modifiées dépourvues de cette protéine, le débit du liquide qui pénètre dans les astrocytes chute de 60 %, ce qui ralentit fortement la circulation de ce fluide dans leurs cerveaux.

outre contrôlé par un neurotransmetteur, la norépinéphrine : lorsque ses concentrations sont faibles, c'est-à-dire durant le sommeil, l'espace interstitiel du cerveau de la souris s'agrandit. L'inverse se produit quand les souris sont éveillées.

Ces nouvelles découvertes confirment que le cerveau endormi exporte des déchets protéiques, notamment la protéine bêta-amyloïde, par la voie du système de transport glymphatique. Des éléments supplémentaires en faveur de cette thèse ont été apportés par l'équipe de David Holtzman, de l'université de Washington à Saint-Louis, qui a démontré que la concentration en protéine bêta-amyloïde dans l'espace interstitiel est plus élevée durant l'état de veille que pendant le sommeil, et que la privation de sommeil aggrave la formation de plaques amyloïdes chez les souris génétiquement modifiées pour les accumuler en excès.

Comme le cerveau élimine la protéine bêta-amyloïde pendant le sommeil à un rythme plus élevé qu'à l'état de veille, les troubles du sommeil des malades d'Alzheimer pourraient contribuer à une aggravation de leur maladie. La nécessité d'enlever du cerveau des déchets potentiellement toxiques est peut-être l'une des raisons pour lesquelles nous dormons pendant un tiers de notre vie !

Jusqu'ici, ces investigations n'ont pas dépassé le stade des recherches fondamentales en laboratoire chez des souris. Mais un médicament capable de réguler le drainage du cerveau, par exemple en augmentant le débit du LCR au cours du sommeil, serait intéressant pour éliminer de la protéine bêta-amyloïde chez un malade d'Alzheimer. Une approche prometteuse, si l'on en croit son efficacité notamment dans le traitement d'une autre pathologie, l'hydrocéphalie à pression normale : dans cette forme de démence observée chez des personnes âgées, une quantité excessive de LCR s'accumule dans les cavités du cerveau (les ventricules cérébraux). Lorsque le liquide est retiré par ponction lombaire, les patients présentent souvent des améliorations remarquables de leurs capacités cognitives. La raison est longtemps restée un mystère. Or nos recherches suggèrent que c'est le rétablissement des flux de

liquide dans le système glymphatique qui restaure la cognition de ces patients.

Devant l'absence de traitement actuel contre la maladie d'Alzheimer, les entreprises pharmaceutiques auraient probablement intérêt à se lancer dans une approche consistant à éliminer les protéines toxiques à grands coups de « lavage » de cerveau. Il est clair que des changements de stratégie sont aujourd'hui nécessaires pour faire face à ces défis, quand on songe que la maladie d'Alzheimer représente, en France, un coût social de 20 à 30 milliards d'euros par an.

Une aide au diagnostic ?

Si le développement d'un médicament n'appartient probablement pas à un futur proche, la connaissance de ce système de drainage devrait néanmoins favoriser la mise au point de nouveaux tests de diagnostic, non seulement pour la maladie d'Alzheimer, mais aussi pour d'autres troubles neurologiques. Une récente étude menée par Helene Benveniste, à la faculté de médecine de Stony Brook, a en effet montré

que l'imagerie par résonance magnétique standard permet de visualiser et de quantifier l'activité du système glymphatique. Des mesures de flux de liquide pourraient fournir un indicateur de l'évolution de la pathologie chez les patients atteints de la maladie d'Alzheimer, de démences apparentées ou d'hydrocéphalie à pression normale ; ou aider à prévoir la capacité de récupération chez des patients souffrant de blessures cérébrales traumatiques.

Nos travaux de recherche ont porté jusqu'ici sur l'élimination des déchets protéiques. Mais selon des études en cours, ce réseau de canaux est susceptible de remplir d'autres fonctions dans le cerveau, telles que le transport de nutriments dans le tissu cérébral ou de glucose dans les neurones. La matière blanche elle-même, qui forme une gaine isolante autour des axones des neurones, dépend peut-être de ce système de transport pour son apport en nutriments. Il est donc probable que ces conduites ne servent pas uniquement d'égouts et jouent d'autres rôles dans la vie quotidienne du cerveau. ■

■ BIBLIOGRAPHIE

N. A. Jessen *et al.*, **The glymphatic system : A beginner's guide**, *Neurochemical Research*, vol. 40, pp. 2583-2599, 2015.

M. J. Simon et J. J. Iliff, **Regulation of cerebrospinal fluid (CSF) flow in neurodegenerative, neurovascular and neuroinflammatory disease**, *Biochimica et Biophysica Acta (BBA) - Molecular Basis of Disease*, publication en ligne, 22 octobre 2015.

J. O'Donnell *et al.*, **Distinct functional states of astrocytes during sleep and wakefulness : Is norepinephrine the master regulator ?**, *Current Sleep Medicine Reports*, vol. 1(1), pp. 1-8, 2015.

SE FORMER À L'UPMC C'EST CONSTRUIRE ET PENSER ENSEMBLE VOTRE AVENIR

FAÎTES LE CHOIX DE L'EXCELLENCE

**UPMC : UNIVERSITÉ DE RECHERCHE
SCIENTIFIQUE ET MÉDICALE**

Une offre complète qui s'adapte à vos besoins

- > Formations qualifiantes inter entreprises
- > Prestations sur mesure, formations intra entreprises
- > Parcours individualisés
- > Accompagnement à la mise en oeuvre de la VAE individuelle ou collective

UPMC
SORBONNE UNIVERSITÉS



www.fc.upmc.fr

SANTÉ

ÉCOLOGIE - BIODIVERSITÉ

CHIMIE ÉLECTRONIQUE

BIOLOGIE

MÉCANIQUE

MATHÉMATIQUES

INFORMATIQUE

Formation continue
Université Pierre & Marie Curie
«Créateur de futurs»

formation.continue@upmc.fr
01 44 27 82 82

Soigner les terres agricoles

RHONDA MANG'YANA, agricultrice au Malawi, a considérablement accru le rendement de ses cultures de maïs en plantant dans son champ des arbres dont les feuilles tombées et les racines restaurent le sol.

D'AFRIQUE

John Reganold et Jerry Glover

Par des méthodes d'agroforesterie, en faisant pousser des arbres, des arbustes et d'autres plantes pérennes au sein de leurs cultures céréalières, des agriculteurs africains revitalisent leurs sols appauvris tout en augmentant les rendements.

Mariko Majoni, au Malawi, a radicalement changé sa façon de travailler la terre. Comme beaucoup de petits agriculteurs africains, il n'avait pas les moyens d'acheter des engrais et, au fil des ans, ses rendements en maïs se sont effondrés. Quand il entendit parler d'« arbres fertilisants » qui captent l'azote de l'atmosphère, il planta des jeunes plants entre ses rangs de maïs. Six ans plus tard, il récoltait dix fois plus de maïs, suffisamment pour nourrir sa famille et pour en vendre. Au début, ses voisins pensaient qu'il était devenu fou. Maintenant, beaucoup d'entre eux ont adopté la même pratique.

Dans une grande partie de l'Afrique subsaharienne, les températures sont élevées, et les journées longues et ensoleillées. Les cultures devraient bien profiter, mais, comme Mariko Majoni, les agriculteurs ont du mal, même lorsqu'ils utilisent des engrais de synthèse. Les rendements du maïs, une céréale de base, sont en moyenne

L'ESSENTIEL

■ En Afrique subsaharienne, beaucoup de sols sont si appauvris que l'ajout d'engrais est vain.

■ La présence d'arbres, d'arbustes, de légumineuses dans les champs aide à restaurer les sols et à réduire l'impact des nuisibles, et ainsi à augmenter les rendements.

■ Plus d'un million d'agriculteurs africains utilisent de telles techniques, mais des millions d'autres ont besoin d'aide pour les appliquer.

© Jim Richardson

de une tonne par hectare – soit près du dixième du rendement moyen (9 tonnes par hectare) atteint en France en 2015. La raison en est simple : une grande partie des sols subsahariens sont très pauvres. Ils manquent de la matière organique et des nutriments dont ont besoin les plantes.

L'ajout d'un surplus d'engrais de synthèse, à lui seul, ne suffit pas toujours pour accroître notablement les rendements ; dans certains cas, il détériore encore plus les sols. La dégradation des sols se poursuit à des vitesses alarmantes, ce qui entraîne une stagnation, voire une baisse, des rendements déjà peu élevés.

Cette situation est inquiétante, car sur les 800 millions de personnes sous-alimentées dans le monde, environ 220 millions vivent dans la région subsaharienne. Et les études récentes indiquent que la population de cette région, de près de un milliard d'individus, va plus que doubler d'ici à 2050 et qu'elle sera durement frappée

par le réchauffement climatique. Sans une amélioration significative des sols, il est sûr que la faim va s'accroître. Restaurer les sols, selon l'avis unanime des scientifiques, est la priorité numéro un pour augmenter la productivité agricole.

En principe, la solution est simple. Il faut restaurer les sols au moyen de matières animales et végétales en décomposition. Cette matière organique ajoute à la terre de l'azote et du carbone, aide à retenir l'eau et à nourrir les microorganismes dont dépend la productivité du sol.

En pratique, cependant, les défis sont nombreux. La plupart des agriculteurs africains n'ont pas les moyens de produire ou d'acheter suffisamment de résidus de moissons, de compost ou d'engrais d'origine animale pour restaurer leur sol. Et cette restauration doit s'effectuer pendant que la terre continue d'être travaillée; les familles ne peuvent pas arrêter de cultiver pendant ce processus. Les agriculteurs sont également confrontés au défi d'accroître les rendements tout en évitant l'emploi excessif d'eau et de produits de synthèse, et de gagner assez d'argent pour maintenir la stabilité financière et sociale de leur famille et de leur communauté.

L'approche qu'a adoptée Mariko Majoni appartient à un ensemble de stratégies dites de pérennisation, qui pourraient faire la différence en Afrique.

Ces méthodes reposent sur la culture d'arbres, d'arbustes et de plantes herbacées pérennes (pluriannuelles) au milieu ou à côté des cultures vivrières, afin de

■ LES AUTEURS



John P. REGANOLD est professeur de science des sols et d'agroécologie à l'université d'État de Washington, aux États-Unis.



Jerry D. GLOVER est conseiller pour les systèmes d'agriculture durable à l'Agence américaine pour le développement international (USAID), à Washington.

renouveler les sols et ainsi augmenter les rendements et la durabilité de la production alimentaire. Les plantes pérennes apportent du carbone et de l'azote au sol, aident à retenir l'eau, à réduire l'érosion, à repousser les ravageurs et à améliorer l'assimilation des engrais de synthèse par les cultures.

Ces techniques sont bien adaptées à des pratiques modernes telles que l'agriculture sans labour et l'agriculture bio, et aux variétés sélectionnées pour une meilleure résistance à la sécheresse, aux maladies et aux nuisibles. Les plantes pérennes fournissent aussi aux agriculteurs du fourrage pour le bétail et du bois comme combustible.

Trois méthodes de pérennisation illustrent comment les agriculteurs peuvent enrichir les sols et accroître, de façon durable, les rendements de cultures de base telles que celles du maïs et du sorgho. Bien que d'autres approches existent, ces trois méthodes ont réussi en Afrique subsaharienne et pourraient y être adoptées plus largement. Elles peuvent aider à accroître les rendements céréaliers et à les faire passer de une à trois tonnes par hectare en quelques années. Et les leçons apprises pourraient bénéficier à d'autres régions du monde où les sols tropicaux ou subtropicaux sont pauvres en nutriments, notamment des pays de l'Asie du Sud et de l'Amérique du Sud.

Trois méthodes à succès

La stratégie de pérennisation la plus couramment employée par les agriculteurs africains, comme Mariko Majoni, est l'« agriculture pérenne » (*evergreen agriculture* en anglais). Les agriculteurs font pousser certains types d'arbres dans leur champ de cultures annuelles. Les feuilles riches en azote de ces arbres tombent et fertilisent le sol en surface, tandis que dans le sol profond, l'activité de leurs racines fournit de l'azote et du carbone.

Les agriculteurs utilisent souvent *Faidherbia albida*, un acacia originaire du continent. Il pousse essentiellement pendant les mois compris entre la moisson et le semis des cultures, et n'entre donc pas en concurrence avec celles-ci pour l'eau, les nutriments ou la lumière du soleil. Dans les régions où les récoltes sont manuelles, les agriculteurs plantent ces arbres au hasard dans leurs champs ou

ALBERT CHAMANGO, agronome malawite, montre ici comment des arachides et des pois d'Angole, plus grands, peuvent prospérer ensemble tout en enrichissant le sol.



© Jim Richardson

les espacent régulièrement de telle façon que les tracteurs et les moissonneuses puissent circuler aisément. Ces dernières décennies, en Zambie, plus de 100 000 agriculteurs ont intégré ces arbres fertilisants dans leurs champs de maïs. Au Niger et au Mali, des agriculteurs ont protégé de jeunes arbres poussant naturellement sur plus de 5 millions d'hectares de champs de millet et de sorgho, créant ainsi des parcs arborés semi-naturels.

Plusieurs autres espèces d'arbres conviennent également. Les arbres, dont certains atteignent 30 mètres de haut, captent aussi d'autres nutriments, tels que du phosphore et du potassium, car leurs racines plongent beaucoup plus profondément dans le sol que celles des cultures. Comme pour l'azote, ces nutriments deviennent disponibles pour les cultures grâce à la litière de feuilles en décomposition et à l'activité racinaire. En outre, les arbres protègent les cultures des vents chauds et secs et réduisent ainsi l'évaporation de l'eau du sol. Ces avantages font parfois doubler les

rendements des céréales, voire les tripler quand ils sont combinés avec des variétés améliorées et des engrais.

En Afrique de l'Est, plus de 30 000 agriculteurs ont adopté une seconde méthode de pérennisation dite *push-pull* (parfois traduit en « répulsion-attraction »). Ils plantent dans leurs champs de maïs, et autour, des espèces particulières de plantes pérennes qui repoussent les insectes nuisibles. Ces espèces limitent la présence des mauvaises herbes, réduisent l'érosion, fournissent de la nourriture pour les animaux et réduisent les besoins en engrais.

Des plantes pour repousser les nuisibles

Par exemple, des agriculteurs d'Afrique de l'Est utilisent des systèmes *push-pull* pour tenir à distance à la fois les pyrales du maïs – papillons dont les larves forent les tiges – et la striga, une mauvaise herbe africaine nommée herbe du sorcier ou herbe-sorcière, qui absorbe les nutriments au détriment

des racines du maïs. Ils plantent entre les rangs de maïs du desmodium (*Desmodium uncinatum*), une légumineuse vivace cultivée habituellement pour nourrir le bétail. Cette plante exhale une odeur qui repousse les pyrales du maïs cherchant à déposer leurs œufs. Et une substance sécrétée par ses racines élimine la striga.

Pour réduire encore les dégâts provoqués par les nuisibles, il est possible d'utiliser une autre plante vivace, le napier, ou herbe à éléphant (*Pennisetum purpureum*), également un bon fourrage pour le bétail, autour du champ de maïs. Cette herbe attire les pyrales du maïs, que le desmodium empêche de pondre dans le champ, tout en produisant une résine collante qui piège les larves écloses.

Les systèmes *push-pull* peuvent plus que doubler les rendements du maïs en cas de prolifération à la fois de pyrales et de striga, et accroissent ces rendements de 25 à 30 % quand seules les pyrales sont présentes. La production de fourrage pour le bétail et l'augmentation de la quantité



LES {Partagez les savoirs} RENDEZ-VOUS DU MUSÉUM

Entrée gratuite

Au Jardin des Plantes

Détails sur mnhn.fr, rubrique : "les rendez-vous du Muséum"

POUR LA SCIENCE

FILMS

Séance Pousse-Pousse (enfants dès 2 ans)

Samedi 24 septembre - 16h : Les amis animaux
Un programme de trois films d'animation suédois pour découvrir différemment la nature et les animaux, en famille !
Réalisation E. Lind Lindström, Suède, 2013, 36 min.

MÉTIER DU MUSÉUM

Dimanche 25 septembre - 15h :
Ethnobotaniste, spécialiste des relations hommes/plantes, E. Katz

Auditorium de la Grande Galerie de l'Évolution
36 rue Geoffroy St-Hilaire, Paris 5^e

COURS PUBLICS

Cycle Une histoire de la Paléontologie

Jeudi 29 septembre - 18h : Évidence de l'objet
Comment le fossile, d'abord objet de curiosité, devient un objet scientifique et un document-clé dans l'étude de l'histoire de la vie. Avec P. Tassy, paléontologue, professeur émérite du Muséum

Grand Amphithéâtre du Muséum - 57 rue Cuvier, Paris 5^e



d'azote dans le sol sont des avantages supplémentaires.

Des scientifiques malawites et américains ont développé la troisième approche – la double culture de légumineuses – adoptée par plus de 8 000 exploitations au Malawi. Dans sa forme la plus simple, le cultivateur plante une légumineuse qui pousse vite et pas très haut, tels l'arachide ou le soja, et ajoute du pois d'Angole, une autre légumineuse qui pousse plus haut, mais beaucoup plus lentement, et qui a des racines plus profondes. Les arachides ou le soja arrivent à maturité en quelques mois, juste au moment où le pois d'Angole les surpasse en hauteur et pourrait leur faire de l'ombre. Après récolte des arachides ou du soja, leurs feuilles tombent et enrichissent le sol. Le pois d'Angole mûrit un ou deux mois plus tard et est récolté, puis ses feuilles tombent, poursuivant l'enrichissement du sol.

Comme ces deux cultures poussent à des vitesses différentes et occupent des profondeurs différentes dans le sol, elles ne sont généralement pas en concurrence pour l'eau ou les nutriments. Ce système augmente la quantité de plantes riches en protéines qu'un fermier peut récolter en une année et améliore les sols tout en nécessitant moins de travail que deux récoltes séparées. Et il élargit le régime alimentaire de la famille du cultivateur.

Le pois d'Angole repousse après avoir été récolté. Ainsi, la saison d'après, les agriculteurs peuvent planter du maïs parmi le pois d'Angole en repousse et, par la suite, récolter le maïs et obtenir une deuxième récolte de pois. Sur deux saisons, ce système produit trois récoltes de légumineuses et une récolte de maïs, et fournit ainsi 50 % de protéines de plus que les rotations traditionnelles maïs-légumineuse.

Pour plus de un million d'agriculteurs africains ayant intégré des plantes vivaces dans leurs pratiques agricoles, les récompenses ont été importantes. Ils ont restauré leurs sols tout en augmentant de façon durable leur production alimentaire et en améliorant spectaculairement leurs moyens d'existence. Mais des millions d'autres agriculteurs en Afrique subsaharienne ne savent même pas que ces techniques existent, ou ont besoin d'aide technique ou financière pour les mettre en œuvre.

Certaines
pratiques permettent
**de doubler,
voire tripler,
les rendements**
tout en évitant
l'appauvrissement
des sols

■ SUR LE WEB

World Agroforestry Center :
<http://www.worldagroforestry.org/>

Adopter de bonnes pratiques agricoles, cependant, est moins facile qu'utiliser des engrais ou des pesticides. Les agriculteurs doivent apprendre à faire pousser ensemble des plantes pérennes et des plantes annuelles, gérer des rotations de récoltes plus longues et imaginer des stratégies commerciales adaptées à une récolte diversifiée. En outre, de nombreux agriculteurs ne sont pas propriétaires de la terre qu'ils cultivent ou n'ont pas un bail de location stable, ce qui les dissuade d'investir dans des solutions à plus long terme.

Une aide internationale nécessaire

Pour développer davantage ce type d'agriculture, la communauté internationale devrait augmenter ses investissements.

Elle devrait soutenir les efforts visant à étendre l'utilisation des techniques couronnées de succès et financer des recherches sur d'autres techniques encore peu testées.

Certains essais sont bien avancés. Ainsi, en partenariat avec les gouvernements de l'Éthiopie, du Rwanda, du Burundi et de l'Ouganda, le projet quadriannuel Trees for Food Security, mené par le World Agroforestry Centre (Centre mondial d'agroforesterie, dont le siège est à Nairobi, au Kenya, un institut de recherche international qui a piloté le développement de l'agriculture pérenne), s'achève en novembre 2016. Les essais de ce projet ont impliqué plus de 5 000 agriculteurs et mis en œuvre environ 2 millions de plants d'arbres. Par ailleurs, le Program for Sustainable Intensification, conduit par l'Agence américaine pour le développement international, soutient les trois techniques que nous avons décrites dans différentes régions d'Afrique subsaharienne.

Des scientifiques de l'organisation internationale ICRISAT (International Crops Research Institute for the Semi-Arid Tropics), de l'université du Malawi et de l'université de l'État du Michigan aident des agriculteurs en Afrique de l'Est à améliorer encore les systèmes de cultures doubles. Ils développent de nouvelles variétés de pois d'Angole adaptées aux diverses conditions climatiques et aux besoins spécifiques

des agriculteurs. D'autres experts ont réussi à créer des versions pérennes de cultures annuelles telles que le sorgho, le blé et le riz, et essaient maintenant d'en augmenter les rendements et d'autres caractéristiques souhaitables. L'université d'État de Washington, l'université d'État du Michigan et le Land Institute à Salina, dans le Kansas, produisent des céréales pérennes qui conviendraient à diverses terres agricoles.

Trouver les meilleures voies de pérennisation

Toutes ces tentatives sont de bons points de départ. Mais les chercheurs ne savent pas encore avec certitude quelles techniques de pérennisation fonctionneraient le mieux dans des environnements variés, en Afrique subsaharienne et ailleurs. Une analyse en profondeur est nécessaire. Pour ce faire, des scientifiques de l'université Rutgers et du département d'agriculture et de bioénergie d'une société chinoise ont proposé la mise en place d'un réseau

mondial de 27 à 45 stations de recherche, notamment en Afrique. On y étudierait l'adéquation d'arbres, arbustes et autres plantes vivaces aux conditions climatiques, environnementales et culturelles locales.

Les scientifiques estiment que 430 millions à 1,4 milliard d'euros permettraient de doter ce réseau de programmes durables. On a estimé les pertes en azote, phosphore et potassium des champs cultivés dans la seule Afrique subsaharienne à 3,2 milliards d'euros par an.

Si l'on considère que la pérennisation permet d'enrayer ces pertes, de puiser de nouvelles ressources plus profondément dans le sol et, quand des légumineuses sont impliquées, de réduire l'utilisation d'engrais azotés, cet investissement semble en valoir la peine. Sans compter que l'extension de la pérennisation de l'agriculture permettra à un nombre plus grand d'agriculteurs africains de nourrir leur famille et leurs voisins, de créer des revenus pour eux-mêmes et les ouvriers agricoles, ce qui augmentera le niveau de vie de leur communauté. ■

■ BIBLIOGRAPHIE

W. Mwase *et al.*, **Factors affecting adoption of agroforestry and evergreen agriculture in Southern Africa**, *Environment and Natural Resources Research*, vol. 5(2), pp. 148-157, 2015.

J. D. Glover *et al.*, **Plant perennials to save Africa's soils**, *Nature*, vol. 489, pp. 359-361, 2012.

D. P. Garrity *et al.*, **Evergreen agriculture: A robust approach to sustainable food security in Africa**, *Food Security*, vol. 2(3), pp. 197-214, 2010.

P. A. Sanchez, **Tripling crop yields in tropical Africa**, *Nature Geoscience*, vol. 3, pp. 299-300, 2010.



les conférences

À la Cité des sciences et de l'industrie

Entrée libre dans la limite des places disponibles

[les mardis à 19h]

cycle

Mégascience: la clé du succès?

Les états financent d'ambitieux programmes scientifiques, fédérant plusieurs pays. Trois exemples récents pour illustrer la place actuelle de la coopération scientifique internationale.

20 septembre
Ondes gravitationnelles : une alliance réussie

27 septembre
Modélisation du cerveau : un pari raisonnable?

4 octobre
Programmes spatiaux, de la Guerre froide à nos jours

Avec le soutien de **SCIENCE** 

programme complet sur cite.sciences.fr



Une bactérie pour lutter **contre** **la dengue**

Scott O'Neill

Si l'on infecte des moustiques vecteurs de la dengue avec certaines bactéries, on bloque la réplication du virus en leur sein. En libérant ensuite ces insectes dans la nature, les chercheurs espèrent limiter fortement la propagation de la maladie.





L'ESSENTIEL

- Des scientifiques tentent de combattre la dengue à l'aide de *Wolbachia*, une bactérie qui stoppe la réplication du virus chez les moustiques *Aedes aegypti*, vecteurs de la maladie.
- La bactérie n'étant pas naturellement présente chez *Aedes aegypti*, les chercheurs doivent infecter les moustiques en laboratoire avant de les relâcher dans la nature.
- La bactérie se transmet de génération en génération parmi les moustiques. Si ces insectes infectés se propagent dans la population sauvage, on pourra réduire la transmission de la dengue.

© Bill Mayer

Le milieu de matinée est le moment idéal pour relâcher des moustiques dans le nord de l'Australie. Plus tard dans la journée, le vent risquerait de disperser les insectes, anéantissant tout espoir d'accouplement. Ainsi, une matinée par semaine, entre janvier et mars 2011, sous une chaleur étouffante, mon équipe de chercheurs et moi grimpons à bord d'un van blanc, la banquette arrière couverte de boîtes Tupperware. Nous nous rendions ainsi dans la ville de Cairns, située à proximité de la Grande barrière de corail. Là, dans une maison sur quatre, quand les habitants avaient donné leur accord pour participer à notre étude, on ouvrait le couvercle d'une de nos boîtes afin de libérer une cinquantaine de moustiques.

Ces insectes ne sont pas des moustiques ordinaires : chacun d'eux est artificiellement infecté par *Wolbachia*, une bactérie qui vit dans les cellules de divers insectes. Chez le moustique vecteur de la dengue, *Wolbachia* présente la particularité de stopper la réplication du virus responsable de la maladie. Ainsi, les moustiques infectés ne transmettent plus le virus aux humains qu'ils piquent, ce qui limite la propagation de la maladie.

Cet été 2011, mon équipe et moi testions donc pour la première fois cette méthode de lutte contre la dengue. Cette maladie, qui infecte 390 millions de personnes chaque année, voit son incidence augmenter ces dernières décennies. Transmise par les piqûres de moustiques, elle s'exprime par de la fièvre, des nausées, des douleurs articulaires et musculaires, et des éruptions cutanées. Dans environ 1 % des cas, une fièvre persistante et des hémorragies multiples se manifestent : c'est la dengue sévère. Cette forme peut être mortelle. Malheureusement, il n'existe pas de traitement spécifique contre la dengue et le premier vaccin vient à peine d'être commercialisé (voir l'encadré page 76). Pour empêcher la propagation du virus, il faut donc lutter contre les moustiques vecteurs, qui appartiennent au genre *Aedes*. Le principal coupable est *Aedes aegypti*, reconnaissable aux rayures blanches sur ses pattes et au motif de lyre sur son thorax. Il vit dans les zones tropicales et subtropicales.

Cependant, les moyens dont on dispose pour combattre ces moustiques sont

maigres. Ces derniers sont devenus peu à peu résistants aux insecticides utilisés en routine et les moustiquaires ne suffisent pas à protéger la population puisque *Aedes aegypti* se nourrit en général pendant la journée. C'est pourquoi l'utilisation de *Wolbachia* représente un véritable espoir pour lutter contre la dengue – ainsi que contre d'autres maladies transmises par des virus via des moustiques (voir l'encadré page 74).

■ L'AUTEUR



Scott O'NEILL est doyen de la faculté des sciences de l'université Monash à Melbourne, en Australie. Il est à la tête d'*Eliminate Dengue*, une collaboration internationale de recherche sur *Wolbachia*.

Des moustiques difficiles à contrôler

Les moustiques comptent parmi les créatures les plus meurtrières. Non pas parce que leur piqûre est mortelle en elle-même, mais parce qu'ils sont les vecteurs de nombreux virus. La fièvre jaune, transmise aussi par *Aedes aegypti*, a causé la mort de plus de soldats américains que les tirs ennemis au cours de la guerre hispano-américaine en 1898. Le paludisme, dû à un parasite véhiculé par les moustiques du genre *Anopheles*, tue chaque année plusieurs centaines de milliers de personnes. *Aedes aegypti* transmet aussi le virus Zika et celui du chikungunya. Il vit dans les zones urbaines et périurbaines, à proximité des habitations, et peut pondre dans n'importe quel point d'eau stagnante, ce qui le rend particulièrement difficile à contrôler. Du fait du réchauffement climatique, son aire de répartition s'étend : selon l'Organisation mondiale de la santé, la moitié de la population mondiale est concernée par le risque de contracter la dengue.

Le mécanisme de l'infection par la dengue est simple. Les moustiques femelles – et seulement les femelles – nous piquent car elles trouvent dans notre sang les protéines nécessaires à la production de leurs œufs. Si une femelle du genre *Aedes* pique un individu porteur du virus de la dengue, elle devient, après la période de réplication du virus, infectieuse.

Ses prochaines victimes seront donc contaminées à leur tour. En revanche, si *Wolbachia* est présente dans les tissus du moustique, la bactérie empêche la transmission en bloquant la réplication du virus à l'intérieur de la femelle.

Cette bactérie a été découverte en 1924 lors de dissections de moustiques communs, de l'espèce *Culex pipiens*. Mais c'est à partir

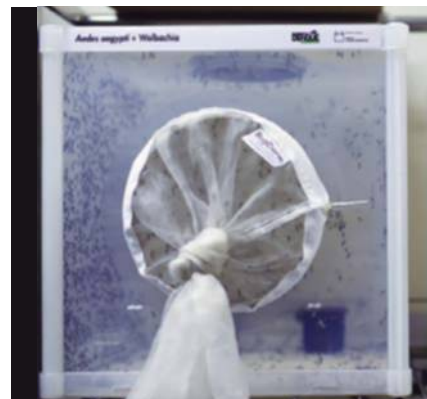
**Aedes
aegypti**
transmet aussi
le virus du chikungunya
et le virus Zika

DES MOUSTIQUES ÉLEVÉS ET INFECTÉS PAR *WOLBACHIA*, PUIS RELÂCHÉS

Le moustique *Aedes aegypti* (ci-dessous) est le principal vecteur de la dengue à l'échelle mondiale, mais les moustiques infectés par la bactérie *Wolbachia* ne peuvent transmettre le virus : la présence des bactéries bloque, par un mécanisme qui reste à déterminer, la réplication du virus au sein du moustique. Les scientifiques élèvent et infectent ces moustiques en laboratoire puis les relâchent dans la nature (photos ci-contre ; celle du haut montre des larves), où ils pourraient petit à petit remplacer les moustiques sauvages et ainsi enrayer la propagation de la dengue.



© Biodesign Institute/Arizona State University



Les trois images sont de Christophe Simon, Getty Images

des années 1970 qu'elle a suscité l'intérêt, quand des chercheurs ont constaté que, dans certaines circonstances, sa présence chez les moustiques femelles empêche l'éclosion des œufs. C'est à ce moment que l'idée d'utiliser cette bactérie dans le cadre de la lutte contre l'insecte a émergé. L'idée est devenue encore plus séduisante lorsque, vingt ans plus tard, les scientifiques ont découvert que certaines souches de *Wolbachia* repérées chez des drosophiles (mouches du vinaigre) raccourcissent aussi la durée de vie du moustique.

Pour ma part, j'ai fait connaissance avec cette fameuse bactérie lorsque j'étais doctorant, au milieu des années 1980. Dès lors, je n'ai eu de cesse de me demander si l'on pouvait utiliser cette bactérie comme un bouclier, pour empêcher la transmission de maladies, en particulier la dengue,

par les moustiques. Car si l'on pouvait diminuer la durée de vie des moustiques – ils vivent en général de quatorze à cinquante jours – ne serait-ce qu'un peu, on limiterait considérablement la capacité de ces insectes à propager un virus au sein de la population humaine.

Mais cela aurait été trop simple. La bactérie se trouve communément dans plus de 60 % des espèces d'insectes, dont des moustiques, mais pas chez *Aedes aegypti*. Et l'infection par *Wolbachia* ne se transmet pas facilement entre espèces. Le défi était donc de trouver un moyen de transférer différentes souches de *Wolbachia* d'un insecte, en l'occurrence la drosophile, vers le moustique véhiculant la dengue. Avec mon équipe de l'université Monash, en Australie, il nous a fallu plus d'une décennie pour y parvenir.

Le procédé d'infection des moustiques par *Wolbachia* est extrêmement délicat. Prenez une aiguille à tricoter, plantez-la dans un ballon de baudruche, puis tentez de retirer l'aiguille sans faire éclater le ballon, et vous mesurerez la difficulté de la tâche. Au laboratoire, on utilise des aiguilles microscopiques pour extraire des bactéries de la drosophile et les injecter à l'intérieur des œufs de moustiques. Nous avons fait éclater des milliers d'œufs avant de parvenir à nos fins.

Puis un autre problème est survenu. Après une génération ou deux, la bactérie

finissait par disparaître des tissus des moustiques : il était donc impossible de diffuser *Wolbachia* au sein des populations sauvages de moustiques. Le microorganisme, habitué à vivre au sein d'une mouche, avait besoin, avant d'être injecté dans le moustique, de s'adapter à ce nouvel environnement cellulaire. Après avoir extrait *Wolbachia* des drosophiles, nous l'avons donc mise en culture dans des lignées cellulaires de moustiques *Aedes aegypti*. Enfin prêtes, les bactéries ont ensuite été réinjectées dans des œufs de moustiques. Enfin, en 2005, nous avons pu observer la bactérie passer de génération en génération. Dès lors, *Wolbachia* a prospéré dans toutes les générations suivantes. Et comme nous l'espérions, l'une des souches de *Wolbachia* raccourcissait effectivement la durée de vie d'*Aedes aegypti*.

La bactérie empêche le virus de se répliquer

La surprise dans cette histoire, c'est que *Wolbachia* s'est révélée plus efficace pour combattre la dengue que ce à quoi nous nous attendions. Dans les moustiques infectés par la bactérie, le virus ne parvient pas à se développer. Nous nous en sommes rendu compte quelques années plus tard. Des recherches que nous menions en parallèle ont révélé que chez les drosophiles, cette bactérie stoppe la réplication du virus *Drosophila C*, un virus mortel pour ces insectes. Mon équipe a alors injecté le virus de la dengue directement chez nos moustiques infectés par *Wolbachia* et nous avons eu le plaisir d'observer que le virus ne s'y répliquait plus. Nous avons abondamment répété cette expérience, à chaque fois avec plusieurs dizaines de moustiques : nos résultats étaient toujours les mêmes.

Après cette nouvelle découverte, la stratégie de diminution de la durée de vie des moustiques a été abandonnée. Désormais, ce que nous voulions, c'est que nos moustiques vivent le plus longtemps possible et se reproduisent très largement, afin de favoriser la propagation de la bactérie au sein de la population de moustiques. Or une femelle infectée par *Wolbachia* transmet la bactérie à la quasi-totalité de sa descendance : seules quelques générations après l'introduction de la bactérie sont nécessaires pour que presque tous les moustiques d'une population en soient porteurs.

Wolbachia, un bouclier à large spectre

Si les premières recherches de lutte contre les maladies virales grâce à *Wolbachia* se sont focalisées sur la dengue, des travaux plus récents montrent que cette bactérie peut servir de bouclier pour d'autres maladies. Ainsi, la souche wMel de *Wolbachia* interrompt la réplication du virus de la dengue chez *Aedes aegypti*, mais aussi celle des virus Zika, du chikungunya et de la fièvre jaune.

Ces résultats sont particulièrement intéressants parce que ces maladies touchent souvent les mêmes pays : en libérant des moustiques infectés par une même souche de bactérie, on peut ainsi lutter contre plusieurs maladies à la fois. Et les virus ne sont pas les seuls à être concernés par cet effet bouclier, puisque la souche wAlbB de *Wolbachia* bloque aussi la transmission du parasite unicellulaire *Plasmodium falciparum*, responsable du paludisme.

En Europe, de nombreuses recherches sont dédiées au moustique tigre, *Aedes albopictus*, car il est le vecteur des mêmes virus que son cousin *Aedes aegypti*. Les deux espèces partagent une grande partie de leur aire de répartition, mais *Aedes albopictus* est en plus tolérant aux climats tempérés, ce qui explique sa présence

notamment dans le sud de la France.

À la différence d'*Aedes aegypti*, le moustique tigre héberge naturellement deux souches de *Wolbachia*. Des recherches ont montré que la présence de ces bactéries a très peu d'effet sur le virus du chikungunya. En revanche, ces *Wolbachia* agissent sur le virus de la dengue en retardant son excrétion dans la salive du moustique : c'est la raison pour laquelle *Aedes albopictus* est un moins bon vecteur de la dengue qu'*Aedes aegypti*.

Avec des chercheurs de l'université d'Oxford et mon équipe de l'institut Pasteur, nous avons voulu tester l'effet de la souche wMel de *Wolbachia* sur les virus de la dengue et du chikungunya chez le moustique tigre. Les résultats sont les mêmes que chez *Aedes aegypti* : *Wolbachia*

wMel limite la transmission des deux virus chez cette espèce. Le spectre d'action de *Wolbachia* wMel est donc très large !

Quel mécanisme se cache derrière ce phénomène ? Le mystère reste à élucider, mais on suppose que la bactérie agit en entrant en compétition avec les virus pour les ressources telles que le cholestérol ou en déclenchant, par sa présence, une réponse immunitaire chez le moustique, laquelle provoquerait l'arrêt de la réplication du virus.

Puisqu'on observe cette réaction uniquement lorsqu'on infecte les moustiques par une souche étrangère de *Wolbachia*, on peut se demander si, à long terme, ces moustiques ne vont pas s'habituer à la présence de la bactérie et réagir différemment. En définitive, si tous les obstacles à cette technique ont été un à un levés en laboratoire, le véritable défi sera l'épreuve du terrain et du temps. Car il est difficile de prévoir comment moustiques, bactéries et virus évolueront en conditions réelles.

– Anna-Bella Failloux
Unité Arbovirus et insectes vecteurs, institut Pasteur, Paris

L'une de nos expériences, réalisée dans différents quartiers de la ville de Cairns, a montré qu'après avoir relâché une dizaine de moustiques par maison chaque semaine pendant dix semaines, plus de 80 % des moustiques sauvages de la zone se trouvaient porteurs de *Wolbachia* – et ils l'étaient toujours quand nous les avons examinés deux ans après avoir cessé de relâcher des moustiques. La bactérie se transmet tellement bien au fil des générations que l'on n'a pas besoin d'intervenir à nouveau : dans un rayon de quelques kilomètres, *Wolbachia* se propage par elle-même.

Avant de relâcher ces moustiques dans la nature, nous avons dû faire face à beaucoup d'inquiétudes au sein de la population locale. Nous avons donc passé beaucoup de temps à organiser des réunions d'information avec les habitants, ainsi qu'à faire du porte-à-porte pour leur demander la permission de libérer des moustiques près de chez eux. Le gouvernement a également évalué la sécurité de nos méthodes avant de nous délivrer les autorisations nécessaires.

Nos expériences ont montré que l'infection de moustiques par *Wolbachia* n'est pas une menace pour les humains : cette bactérie est trop grosse pour passer à travers le conduit salivaire des moustiques jusqu'au sang humain. Des volontaires ont accepté de se laisser piquer par des moustiques infectés pendant trois ans. À l'issue de cette période, aucune trace de la bactérie dans leur sang n'était détectée. De fait, on trouve déjà *Wolbachia* chez de nombreuses autres espèces de moustiques, y compris celles qui nous piquent régulièrement.

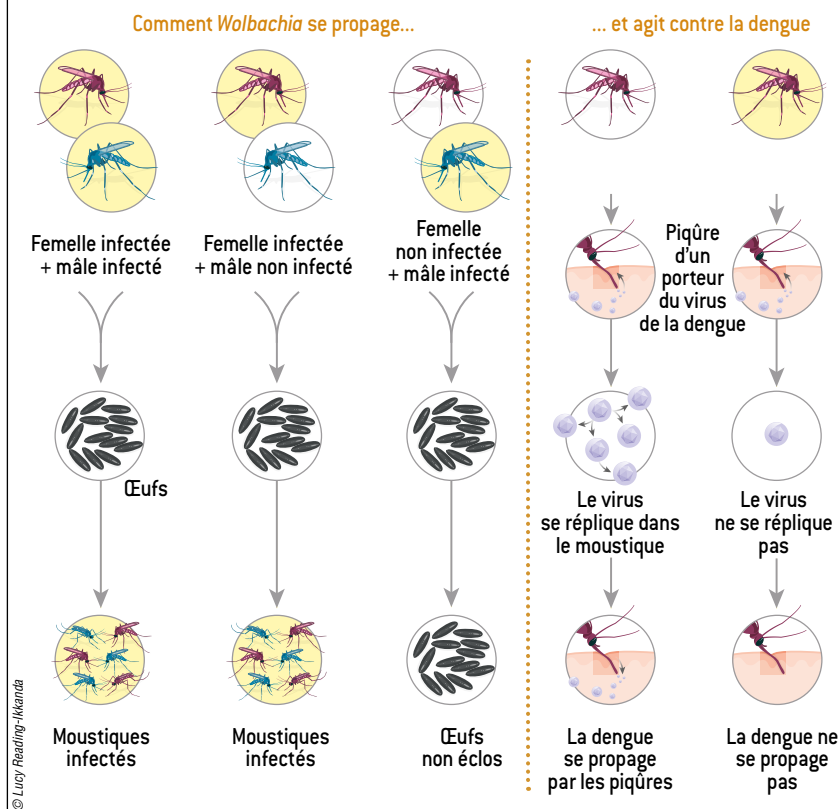
Wolbachia, sans danger pour les humains

Wolbachia ne représente pas non plus un danger pour l'environnement. Depuis 2011, quand nous avons commencé à relâcher dans la nature des moustiques infectés, nous avons étudié les animaux et les insectes qui s'en nourrissent. Nos travaux ont confirmé que cette bactérie vit uniquement au sein des cellules d'insectes et d'autres arthropodes.

Outre les tests réalisés en Australie ces quatre dernières années, des lâchers de moustiques sont en cours depuis un an dans des zones particulièrement touchées par la dengue : au Vietnam, en Indonésie, en Colombie et au Brésil. Notre équipe s'est associée à des équipes dans ces différents pays, via le programme international

LES SECRETS DU SUCCÈS DE WOLBACHIA

C'est la femelle d'*Aedes aegypti* qui doit porter la bactérie *Wolbachia* pour la transmettre à sa descendance, qu'elle s'accouple avec un mâle porteur ou non porteur. Si la femelle n'est pas infectée par la bactérie mais que le mâle l'est, leurs œufs n'arriveront pas à éclosion. Lorsqu'une femelle infectée par *Wolbachia* pique une personne porteuse du virus de la dengue, le virus ne se réplique pas au sein du moustique. Les futures victimes des piqûres de cette femelle sont ainsi protégées de la maladie.



Eliminate Dengue que nous avons mis sur pied. On sait désormais que *Wolbachia* peut se propager facilement au sein de petites communautés vivant dans un périmètre d'une dizaine de kilomètres. Nous voulons maintenant tester le procédé à une plus grande échelle. Mais élever assez de moustiques infectés par *Wolbachia* jusqu'à l'âge adulte avant de les libérer demande beaucoup de travail. C'est pourquoi nous testons une nouvelle méthode, à Townsville, dans le nord-est de l'Australie, grâce à la participation de la population locale. Des milliers de volontaires ont ainsi accepté de prendre chez eux des boîtes contenant des œufs porteurs de la bactérie. Ils les relâchent dès que les insectes ont atteint l'âge adulte.

Parallèlement, d'autres équipes de chercheurs développent des approches alternatives pour lutter contre *Aedes aegypti*.

Premières vaccinations contre la dengue

En décembre 2015, le laboratoire pharmaceutique français Sanofi-Pasteur a lancé la commercialisation de Dengvaxia, le tout premier vaccin contre la dengue. Il se compose d'un cœur constitué du virus de la fièvre jaune, dont on a atténué la virulence et dans lequel ont été insérés des gènes qui codent des protéines des quatre sérotypes de la dengue.

Ce vaccin « quatre en un » doit en effet répondre à un défi de taille : protéger contre les quatre formes sous lesquelles se présente le virus de la dengue. Car lorsqu'une personne est infectée par l'une d'elles au cours de sa vie, elle est protégée contre celle-ci par la suite, mais pas contre les trois autres. Les personnes vaccinées développent ainsi des cellules immunitaires « mémoires » capables de reconnaître et de combattre le virus quelle que soit sa forme. Cependant, l'efficacité du vaccin n'est pas maximale : les niveaux de protection varient de 43 % à 77 % selon le sérotype. « Ce n'est pas encore le vaccin idéal, mais c'est une très belle avancée », commente Odile Launay, directrice du centre d'investigation clinique sur la vaccinologie de l'hôpital Cochin, à Paris. « L'ennui principal, c'est qu'il

est inefficace chez les enfants de moins de neuf ans, qui représentent pourtant une population à haut risque. » Quant à l'efficacité à long terme de Dengvaxia, elle est difficile à prédire, comme pour tous les nouveaux vaccins. « Cela dit, on est plutôt confiant avec les vaccins vivants atténués, avance Odile Launay. Dans les zones très touchées par la maladie, les personnes sont constamment exposées aux virus lorsqu'elles se font piquer. Cela permet de maintenir le niveau d'anticorps et donc la protection. »

Depuis avril 2016, l'Organisation mondiale de la santé (OMS) recommande ainsi l'utilisation de Dengvaxia chez les personnes de plus de neuf ans vivant dans les zones très touchées par la maladie. Les résultats des tests cliniques menés par Sanofi montrent

un niveau de protection de 66 % chez ces personnes. Des résultats significatifs pour une maladie qui, selon l'OMS, entraîne 500 000 hospitalisations pour des cas de dengue sévère et environ 12 500 morts par an dans le monde. Le groupe pharmaceutique a déjà obtenu le feu vert des Philippines, du Mexique, du Brésil et du Salvador pour commercialiser son vaccin.

Pendant que ces premières vaccinations ont lieu, au moins cinq laboratoires travaillent au développement d'autres vaccins contre la dengue. Le laboratoire Sanofi a, lui, entamé des recherches sur le vaccin contre le virus Zika, qui appartient à la même famille, les Flaviviridae, que celui de la dengue. Des anticorps capables de neutraliser à la fois le virus de la dengue et le virus Zika ont même été identifiés récemment par des chercheurs de l'institut Pasteur, en collaboration avec des chercheurs anglais et autrichiens, ce qui ouvre la voie à de nouvelles recherches sur un vaccin commun à ces deux maladies.

— Héléne Gélot
Journaliste scientifique

Certains relâchent des moustiques mâles génétiquement modifiés, dont les cellules sexuelles contiennent des gènes létaux. Si ces moustiques se reproduisent, leur descendance ne peut survivre. Cette technique est efficace, mais assez coûteuse. En effet, pour fonctionner à une échelle assez grande, il faut constamment relâcher des moustiques génétiquement modifiés, sinon les moustiques sauvages des alentours viennent repeupler la zone. En outre, l'usage de moustiques génétiquement modifiés fait face à de vives oppositions de la part de la population.

Au contraire, si l'usage de *Wolbachia* demande un investissement initial, le processus s'autoentretient ensuite, quand suffisamment de moustiques infectés par la bactérie ont été relâchés dans une zone. Cette technique pourrait donc représenter un moyen peu coûteux d'éradiquer la dengue, qui touche particulièrement des pays tropicaux assez pauvres. En outre, cette méthode a l'avantage de ne nécessiter aucune modification génétique. Cependant, sa mise en pratique sur le terrain demande des années de travail, afin de sensibiliser la population.

■ BIBLIOGRAPHIE

M. T. Aliota et al., *The wMel strain of Wolbachia reduces transmission of chikungunya virus in Aedes aegypti*, *PLoS Neglected Tropical Diseases*, vol. 10(4), e0004677, 2016

N. M. Ferguson et al., *Modeling the impact on virus transmission of Wolbachia-mediated blocking of dengue virus infection of Aedes aegypti*, *Science Translational Medicine*, vol. 7, article 279ra37, 2015.

F. D. Frentiu et al., *Limited dengue virus replication in field-collected Aedes aegypti mosquitoes infected with Wolbachia*, *PLoS Neglected Tropical Diseases*, vol. 8(2), e2688, 2014.

E. P. Caragata, *Dietary cholesterol modulates pathogen blocking by Wolbachia*, *PLoS Pathogens*, vol. 9(6), article e1003459, 2013.

Nous avons encore un défi majeur à relever : mesurer de combien est réduite la maladie lorsque nous introduisons *Wolbachia* dans une zone. Ce sera particulièrement difficile pour plusieurs raisons. Dans les zones où nous travaillons, on manque de données fiables sur le nombre de cas déclarés de dengue et les taux d'infection peuvent fortement varier d'année en année. Pour confirmer l'efficacité de la méthode, il faudra donc comparer la prévalence de la dengue dans les régions où nous avons mis notre technique en pratique à celle d'autres où ce n'est pas le cas. Cela exigera d'effectuer de nombreuses prises de sang, ce qui sera laborieux.

Ce travail vaut cependant la peine, et pas seulement pour lutter contre la dengue (voir l'encadré page 74). Pour l'heure, notre équipe se concentre sur l'évaluation de la méthode *Wolbachia* pour combattre la dengue. C'est sur cette maladie que nous sommes le plus proches de mesurer un véritable impact. Diverses équipes à travers le monde s'investissent dans ce projet dans l'espoir qu'un jour, une piqûre de moustique n'aura pas d'autre conséquence qu'un simple bouton sur la peau. ■

Dans l'**inter**êt de la science

mathieu
vidard

la tête au carré
14:05-15:00



intervenez
franceinter.fr

LOGIQUE & CALCUL

Les arbres des mathématiciens sont-ils tous gracieux ?

Au détour de questions sur les graphes et leur décomposition surgit un problème qui se formule simplement et qui, cinquante ans plus tard, résiste toujours.

Jean-Paul DELAHAYE

Les mathématiciens ont leur propre conception de ce qui est beau. Ce qu'ils dénomment « graphes gracieux » ou « arbres gracieux » ne vous semblera pas aussi ravissant qu'une ballerine d'opéra interprétant *Le Lac des cygnes*... Or ces notions introduites en 1967 par le mathématicien slovaque Alexander Rosa désignent une catégorie de structures combinatoires dotées de propriétés délicates et rares. Leur attrait esthétique n'est resenti que si l'on sait que l'ajustement nécessaire à leur construction est difficile et improbable.

Un graphe de n arcs (ou arêtes) est dit gracieux si l'on peut numéroté ses nœuds par des entiers différents pris entre 0 et n de façon que les arcs soient numérotés par tous les entiers de 1 à n quand on associe à chaque arc la valeur absolue de la différence des numéros de ses extrémités.

La définition est un peu raide ! Procédons plus lentement :

a) Un « graphe numéroté » est un graphe auquel on a associé un entier positif ou nul à chaque nœud.

b) La « valeur » d'un arc d'un graphe numéroté est la valeur absolue de la différence des numéros de ses extrémités.

c) Un graphe de n arcs est « gracieux » si l'on peut numéroté ses nœuds par certains des entiers pris entre 0 et n , de façon que les valeurs des arcs soient tous les entiers de 1 à n . Le graphe a dans l'encadré page ci-contre est un exemple de graphe gracieux.

Les graphes que nous considérerons ici sont non orientés (l'arc AB est identique à l'arc BA), connexes (d'un seul tenant), sans boucle (pas d'arc liant un nœud à lui-même) et sans arc multiple (un arc, au plus, relie deux nœuds différents).

Placer des entiers aux nœuds d'un graphe donné pour établir qu'il est gracieux est un jeu : il faut tâtonner, vérifier, recommencer, etc. La difficulté est qu'on a la certitude d'avoir réussi seulement lorsque tous les nœuds sont numérotés, et qu'il est souvent impossible de concevoir des méthodes progressives de numérotation des nœuds. Essayez avec les cinq graphes b, c, d, e, f de la page ci-contre en tentant d'identifier le seul graphe de cette série qui n'est pas gracieux [solutions sur le site de Pour la Science : <http://bit.ly/pls467-delahaye>].

Des familles de graphes

On remarquera que si l'on a une numérotation des nœuds qui rend gracieux un graphe de n arcs, alors, en remplaçant chaque numéro a d'un nœud par $n-a$, on obtient une autre numérotation satisfaisante. En effet, d'une part, si a est compris entre 0 et n , c'est aussi le cas pour $n-a$. D'autre part, l'égalité $|(n-a) - (n-b)| = |a-b|$ est évidente, et donc les arcs seront numérotés de la même façon avec la nouvelle numérotation des nœuds : par tous les entiers entre 1 et n .

Le jeu devient un problème mathématique quand on introduit des classes de graphes.

Considérons par exemple la classe la plus simple de graphes, les « graphes linéaires », constitués de n nœuds $a_1, a_2, \dots, a_n$ reliés le plus simplement possible par des arcs $a_1-a_2, a_2-a_3, \dots, a_{n-1}-a_n$.

On découvre sans peine que tous sont gracieux en numérotant de gauche à droite un nœud sur deux par les entiers 0, 1, 2, ... puis, arrivé au bout, en repartant de droite à gauche pour numéroté les nœuds oubliés lors du premier passage [graphe h ci-contre].

Cette numérotation régulière qui rend le graphe linéaire gracieux n'est pas la seule : il existe un grand nombre de telles numérotations. Les chercheurs ont établi en 2003 que ce nombre est supérieur à $[5/3]^n$ pour le graphe linéaire à n nœuds. Ce résultat a été amélioré, à l'aide d'un ordinateur, par le mathématicien polonais Michał Adamaszek, lequel a montré que le nombre de numérotations possibles est supérieur à $[2,37]^n$.

Une autre classe infinie de graphes gracieux facile à découvrir est celle des graphes en étoile [graphe g ci-contre]. Le nœud au centre, numéroté 0, est relié à n autres nœuds numérotés 1, 2, ..., n ; bien évidemment, cela produit la numérotation attendue 1, 2, ..., n des arcs. Il n'y a qu'une seule numérotation, les autres s'y ramenant par permutation des branches de l'étoile.

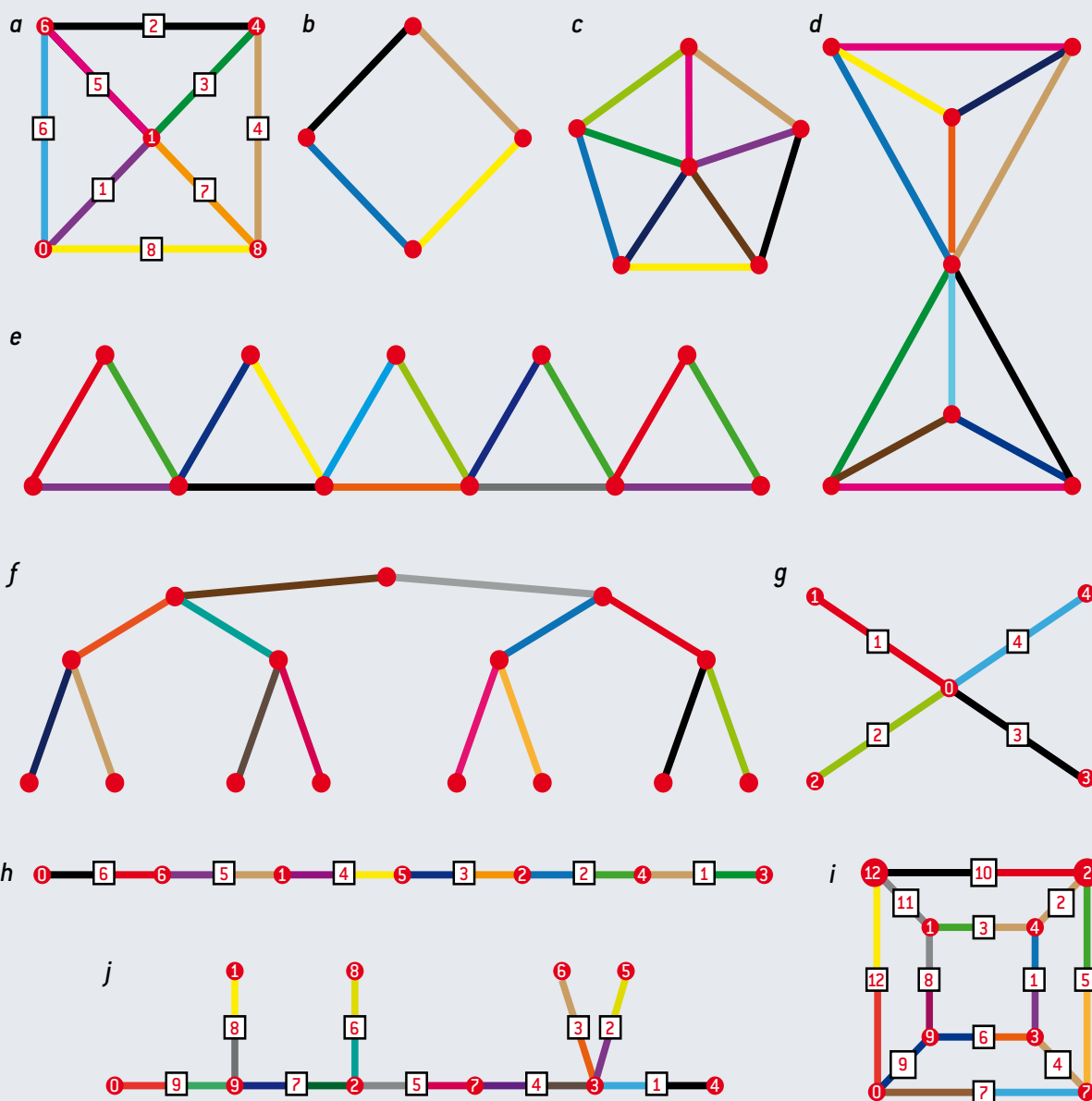
Depuis qu'on s'intéresse à cette propriété des graphes, une multitude de classes de graphes ont été prouvées gracieuses. Citons-en quelques-unes.

Neuf exemples de graphes gracieux et un intrus

Ci-dessous figure un exemple de graphe gracieux doté de 8 arcs (a). Pour prouver que ce graphe est gracieux, on numérote ses nœuds par des entiers pris entre 0 et 8, de telle façon qu'en associant à chaque arc l'entier correspondant à la différence entre les numéros de ses extrémités, on obtienne tous les entiers 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8. On vérifie aisément que la numérotation indiquée convient.

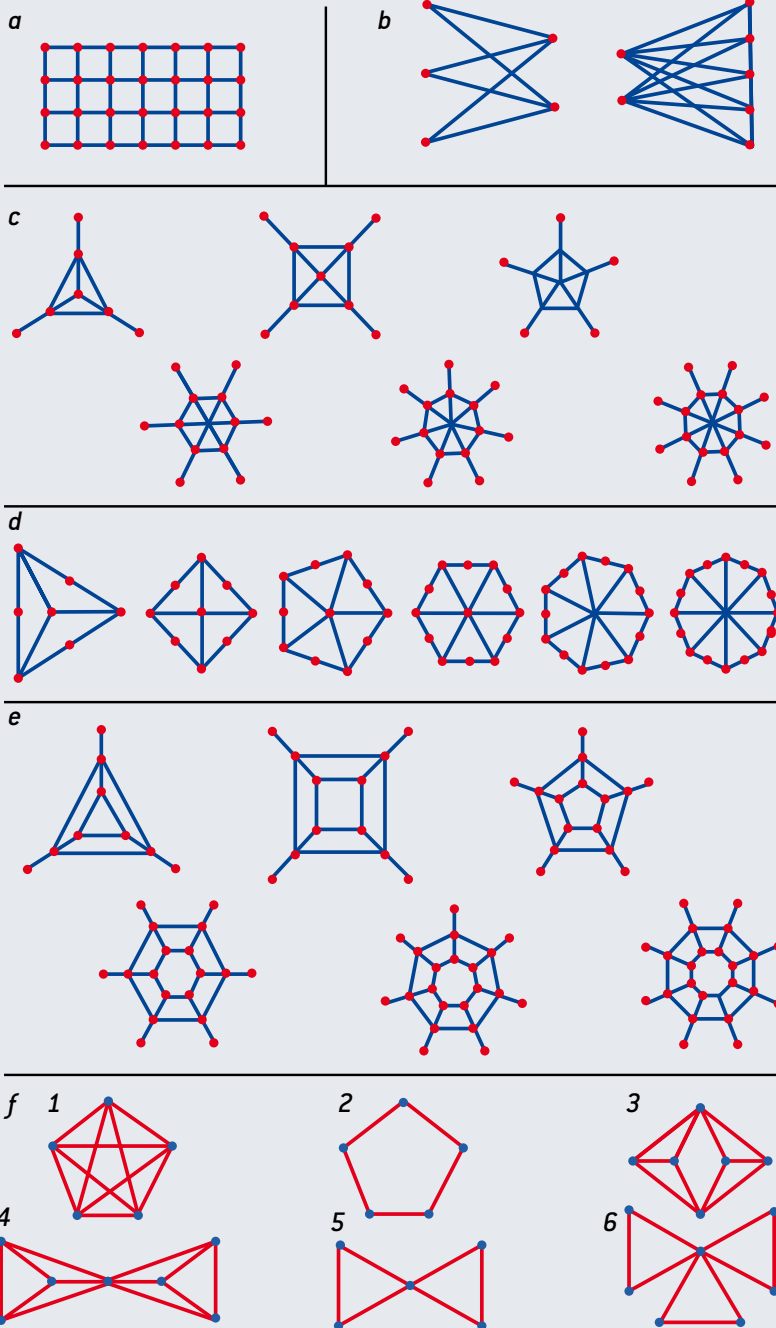
Numéroter les nœuds d'un graphe pour prouver qu'il est gracieux ressemble un peu à un jeu de sudoku. C'est possible pour 4 des 5 graphes b, c, d, e, f ci-dessous. Trouvez comment, et repérez le seul graphe disgracieux (les solutions sont sur <http://bit.ly/pls467-delahaye>).

Tous les graphes en étoile (g) ou linéaires (h) sont gracieux. Les procédés utilisés pour les deux exemples se généralisent. En i et j sont montrés deux graphes gracieux (chenille et hypercube) avec les numérotations qui prouvent leur gracieusité.



Zoologie de graphes gracieux et disgracieux

Un grand nombre de familles de graphes ont été démontrées gracieuses, par exemple les graphes en grille rectangulaire (a), les graphes biparti-complets (b), les graphes gouvernails (c), les graphes engrenages (d), les graphes en toile d'araignée (e). Les graphes de la série f sont, eux, disgracieux.



• Tous les graphes « roue » sont gracieux.

Un graphe roue (figure c, page 79) est constitué d'un nœud central relié à n nœuds $a_1, a_2, \dots, a_n$ disposés autour de lui, ces nœuds étant eux-mêmes liés pour former un cercle d'arcs $a_1 - a_2, a_2 - a_3, \dots, a_{n-1} - a_n, a_n - a_1$.

• Tous les graphes « chenille » sont gracieux. Les graphes chenille (figure j, page 79) sont les graphes qui donnent un graphe linéaire lorsqu'on enlève tous les nœuds attachés par un seul arc ainsi que tous les arcs associés à de tels nœuds.

• Tous les graphes représentant des « hypercubes » [carré, cube, etc.] sont gracieux (figure i, page 79).

Ajoutons que tous les graphes « grille rectangulaire », tous les graphes « biparti-complets », tous les graphes « engrenage », tous les graphes « gouvernail », tous les graphes « toile d'araignée » sont gracieux (voir l'encadré ci-contre). Nous n'avons pas indiqué comment numéroter les nœuds de ces graphes pour établir que ces derniers sont gracieux : ce sera pour vous une occupation mathématique intéressante dans un train ou un avion...

Une conjecture cinquantenaire

Les graphes gracieux sont nombreux, et l'on connaît un procédé qui permet d'énumérer tous les graphes gracieux à n arcs. Leur nombre est exactement $n!$ [c'est-à-dire $n(n-1)(n-2) \dots 1$], ce qui est étonnant. Hélas, ce procédé n'aide guère à connaître mathématiquement les graphes gracieux. Par ailleurs, les procédés proposés pour montrer qu'une classe de graphes est composée uniquement de graphes gracieux, tel celui que nous avons décrit pour les graphes linéaires, ne sont pas généraux.

En particulier, alors que l'on ne connaît aucun contre-exemple, on n'a pour l'instant pas réussi à démontrer que tout arbre – c'est-à-dire un graphe connexe sans cycle – est gracieux. Cette « conjecture des arbres gracieux » a été énoncée par Gerhard Ringel, Anton Kotzig et Alexander Rosa en 1967.

La simplicité de l'énoncé a attiré nombre de mathématiciens, lesquels ont démontré des résultats partiels, tel celui concernant

les graphes chenilles. Pourtant, depuis cinquante ans, personne n'a jamais proposé une preuve du résultat attendu pour les arbres, qui reste l'une des conjectures les plus troublantes des mathématiques.

Les calculs réalisés en 1998 à l'ordinateur par Robert Aldred, de l'université d'Otago en Nouvelle-Zélande, et Brendan McKay, de l'université nationale australienne à Canberra, ont montré que tous les arbres ayant au plus 26 nœuds sont gracieux (il existe 279 793 450 arbres à 26 nœuds). Depuis, d'autres programmes ont confirmé la conjecture pour les 14 830 871 802 arbres à 30 nœuds, les 2 262 366 343 746 arbres à 35 nœuds et les 363 990 257 783 343 arbres à 40 nœuds.

Les graphes disgracieux

De nombreux graphes sont gracieux, mais ils ne le sont pas tous. Les graphes non gracieux ou « disgracieux » les plus petits sont donnés en bas de l'encadré page 80.

Démontrer qu'un graphe est disgracieux est intéressant et parfois difficile. Nous allons détailler deux petits résultats permettant de prouver que de nombreux graphes sont disgracieux.

Le premier résultat affirme : « Si un graphe G à n arcs est gracieux, alors l'ensemble de ses nœuds peut être séparé en deux sous-ensembles disjoints P et I , tels que le nombre d'arcs reliant un nœud de P à un nœud de I est exactement $\lfloor (n+1)/2 \rfloor$. » La notation $\lfloor \cdot \rfloor$ désigne la partie entière : $\lfloor 1,22 \rfloor = 1$, $\lfloor 4,5 \rfloor = 4$, etc. Par exemple, si G comporte 6 arcs et s'il est gracieux, alors il existe une séparation des nœuds en deux sous-ensembles disjoints P et I qui sont liés par exactement 3 arcs.

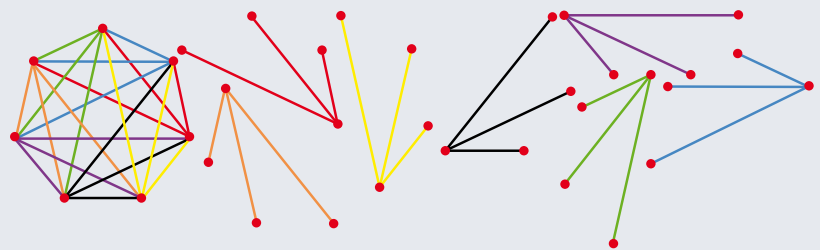
La démonstration est assez simple. Si G est gracieux, on peut numérotiser ses nœuds avec des entiers compris entre 0 et n de telle façon que les arcs soient numérotés 1, 2, ..., n . Notons P l'ensemble des nœuds numérotés par des entiers pairs, et I celui des nœuds numérotés par des entiers impairs. Chaque arc numéroté par un entier impair établit un lien entre un nœud de P et un nœud de I , car la différence des numéros des extrémités d'un arc ne peut être impaire

Décomposition d'un graphe complet

Dans un graphe dit complet, chaque nœud est relié à tous les autres. Le graphe complet à 7 nœuds comporte 21 arcs. Il peut se décomposer en 7 graphes élémentaires tous identiques à une étoile à trois branches (un arbre, c'est-à-dire un graphe connexe sans cycle, à 4 nœuds).

Plus généralement, on conjecture qu'un graphe complet à $2n+1$ nœuds se décompose en $2n+1$ copies de l'arbre A , quel que soit l'arbre A à n nœuds.

Cette conjecture sera démontrée si l'on réussit à démontrer la conjecture de Ringel-Kotzig-Rosa qui affirme que tout arbre est gracieux. Depuis cinquante ans, les mathématiciens cherchent à démontrer ces deux conjectures.



que si l'une des extrémités est paire et l'autre impaire. Seuls ces arcs impairs établissent de tels liens. Or parmi les entiers 1, 2, ..., n , il y a exactement $\lfloor (n+1)/2 \rfloor$ entiers impairs, ce qui prouve l'énoncé.

Le second résultat concerne les graphes eulériens, autrement dit les graphes connexes dont chaque nœud a un nombre pair d'arcs incidents. Ces graphes ont la propriété qu'on peut en parcourir tous les arcs par un chemin revenant à son point de départ et empruntant chaque arc une fois exactement. Dans le premier article sur le sujet, Alexander Rosa a démontré que si le nombre d'arcs d'un graphe eulérien est de la forme $n=4k+1$ ou $n=4k+2$, alors il est disgracieux.

La démonstration se fonde sur le premier résultat. Supposons qu'un tel graphe G soit gracieux et montrons que cela conduit à une contradiction. En parcourant un chemin eulérien de G qui revient à son point de départ, on passe d'un nœud pair P à un nœud impair I à chaque fois qu'on passe par un arc numéroté par un nombre impair, c'est-à-dire exactement $\lfloor (n+1)/2 \rfloor$ fois. Or si $n=4k+1$, on a $\lfloor (n+1)/2 \rfloor = \lfloor (4k+2)/2 \rfloor = \lfloor 2k+1 \rfloor = 2k+1$; et si $n=4k+2$, on a $\lfloor (n+1)/2 \rfloor = \lfloor (4k+3)/2 \rfloor = \lfloor 2k+1 + 1/2 \rfloor = 2k+1$. À chaque fois, le résultat est un

nombre impair, ce qui est impossible puisque le chemin eulérien revient à son point de départ et donc relie un nombre pair de fois un nœud pair P à un nœud impair I .

Ce résultat s'applique aux deux premiers et deux derniers graphes de la figure f dans l'encadré page 80. Il montre plus généralement que les graphes en anneaux (des arcs $a_1, a_2, \dots, a_n$ liés pour former un cercle $a_1 - a_2, a_2 - a_3, \dots, a_{n-1} - a_n, a_n - a_1$) ne sont jamais gracieux si $n=4k+1$ ou $n=4k+2$, car, bien sûr, de tels graphes sont eulériens. Le résultat s'applique aussi à ces mêmes anneaux ayant au départ $n=4k+1$ ou $4k+2$ arcs dont on fusionne deux nœuds une ou plusieurs fois, comme par exemple le graphe obtenu en prenant trois triangles qu'on colle les uns aux autres en fusionnant des sommets (figure $f6$ dans l'encadré page 80).

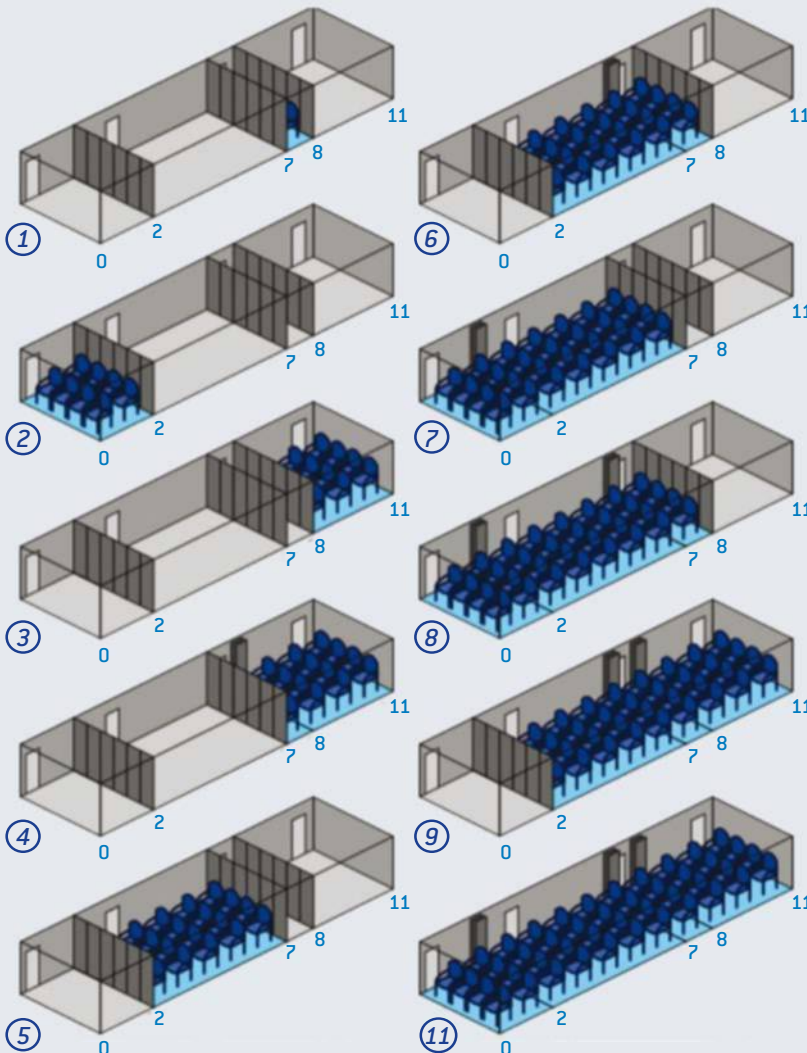
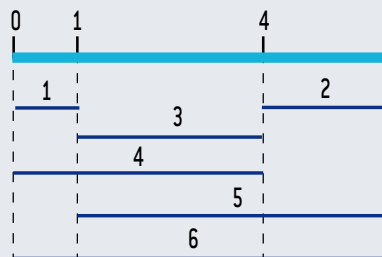
Une modestie d'Erdős ?

Chez les graphes, être disgracieux est en réalité le triste lot de presque tous. Le mathématicien hongrois Paul Erdős a en effet démontré que la proportion de graphes disgracieux parmi les graphes à n nœuds augmente quand n tend vers l'infini, et que cette proportion tend vers 100 %. En construi-

Les règles de Golomb

La règle considérée par Solomon Golomb ne comporte que 4 graduations et permet cependant de mesurer les longueurs 1, 2, 3, 4, 5, 6 (voir le schéma ci-dessous). Il n'existe pas de règles équivalentes comportant 5 graduations et permettant de mesurer toutes les longueurs entières de 1 à 10.

Les règles « optimales » de Golomb sont celles qui, pour un entier n donné, sont les plus courtes et telles que les distances entre deux marques sont toutes différentes. Elles sont utiles dans diverses applications. Par exemple, avec seulement 3 murs escamotables, une salle de spectacle est modulable en 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9 ou 11 rangées de fauteuils (nombres entourés, ci-dessous).



https://en.wikipedia.org/wiki/Golomb_ruler

sant au hasard un graphe ayant un grand nombre de nœuds, il est donc très probable qu'il soit disgracieux. Assez curieusement, Erdős n'a pas publié sa démonstration, bien qu'il fût pourtant très attaché à la publication de ses résultats (il a signé ou cosigné plus de 1 500 articles de mathématiques). D'autres l'ont refaite un peu plus tard.

La conjecture des arbres gracieux est importante non seulement parce qu'il est rageant d'être face à un énoncé aussi simple qui résiste, mais également parce que sa démonstration conduirait à prouver une autre jolie conjecture, qui attend elle aussi depuis cinquante ans.

Alexander Rosa a démontré que si A est un arbre gracieux quelconque à n nœuds, alors le graphe complet K_{2n-1} ($2n-1$ nœuds dont chacun est lié à tous les autres) se décompose en $2n-1$ copies de A (voir l'encadré page 81).

La conjecture « Pour tout arbre A à n nœuds, le graphe complet K_{2n-1} se décompose en $2n-1$ copies de A », dénommée conjecture de Ringel, serait donc prouvée si l'on démontrait la conjecture de Ringel-Kotzig-Rosa affirmant que tout arbre est gracieux. Ce n'est pour l'instant pas le cas.

Notons que si la conjecture de Ringel-Kotzig-Rosa entraîne la conjecture de décomposition, l'inverse n'est pas vrai : certains arbres A à n nœuds pourraient ne pas être gracieux bien que K_{2n-1} se décompose en copies de A .

On imagine mal à quel point le travail des mathématiciens confrontés à des problèmes de ce type est intense, déterminé et consciencieux. Dans le cas des conjectures qui nous intéressent, la possibilité d'obtenir des résultats partiels (par exemple en établissant qu'une certaine classe de graphes est gracieuse ou non) a conduit à une multiplication des travaux. Plus de 2 000 articles de recherche sur le sujet des numérotations et décompositions de graphes ont été publiés depuis celui d'Alexander Rosa paru en 1967.

Un résumé des résultats est régulièrement mis à jour. Ce document recense les références des publications et énonce sans démonstration les résultats principaux du domaine. La dernière version de ce résumé, proposée par l'Américain Joseph Gallian

en 2015, s'étend sur 389 pages et donne les références de 2012 articles !

Poursuivons nos questions à propos des graphes complets à n nœuds, notés K_n . Le nombre d'arcs du graphe K_n est égal à $n(n-1)/2$: chaque nœud est lié à $n-1$ autres (rappelons qu'on interdit les arcs liant un nœud à lui-même), ce qui fait un total de $n(n-1)$ liens, qu'il faut diviser par 2 puisque l'arc AB est considéré identique à l'arc BA. On démontre que K_n n'est gracieux que si $n = 1, 2, 3$ ou 4.

Les graphes complets et les règles de Golomb

C'est bien dommage, car cela aurait permis de fabriquer d'élégantes règles de mesure comportant peu de graduations. Considérons par exemple la numérotation qui rend gracieux le graphe K_4 . Ses nœuds sont numérotés 0, 1, 4, 6. Les arcs, eux, sont numérotés 1, 2, 3, 4, 5, 6. En plaçant les nœuds sur une règle et les disposant de façon que les nœuds soient à distance 0, 1, 4 et 6 d'un repère initial, on obtient une règle n'ayant que 4 graduations et qui peut toutefois mesurer les distances 1, 2, 3, 4, 5, 6 (voir l'encadré page ci-contre).

Si le graphe K_5 , qui comporte 10 arcs, avait été gracieux, on aurait pu construire une règle à 5 graduations permettant de mesurer les distances 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10. Une telle règle n'existe pas. On peut chercher à s'en approcher en essayant de placer n marques sur une règle en des positions entières, de telle façon que les distances entre deux marques soient toujours différentes. Bien sûr, le système de n marques conduisant à la règle la plus courte (celle dont les deux graduations extrêmes sont les plus rapprochées) donne la règle la plus intéressante. C'est ce qu'on dénomme la « règle optimale de Golomb d'ordre n ». Elle porte le nom du mathématicien américain Solomon Golomb, qui s'est intéressé à tous ces problèmes et à bien d'autres, et qui est décédé tout récemment, le 1^{er} mai 2016.

Pour 5 marques, il y a en fait deux graduations optimales : celle où on place les marques en 0, 1, 4, 9, 11 et celle où elles sont en 0, 2, 7, 8, 11. On peut grâce à elle

fabriquer une règle à 5 graduations qui mesure toutes les distances 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 11 (il manque 10). Cela permet alors de concevoir une salle de réunion ayant trois murs escamotables et qui pourra recevoir $k, 2k, 3k, 4k, 5k, 6k, 7k, 8k, 9k$ ou $11k$ personnes selon les murs utilisés, où k est le nombre de chaises de chaque rangée (voir l'encadré page ci-contre).

La recherche des règles optimales de Golomb est particulièrement difficile et de nombreuses heures d'ordinateur y ont été consacrées. Des tableaux de records sont établis. Démontrer que les règles figurant dans ces tableaux de records ne peuvent être améliorées exige un travail supplémentaire, qui n'a pas pu être mené très loin faute d'une théorie puissante de ces structures combinatoires.

Aujourd'hui, on connaît avec certitude les règles optimales de Golomb pour 1 à 27 graduations. Leur longueur est donnée en bleu, entre parenthèses :

1 [0], 2 [1], 3 [3], 4 [6], 5 [11], 6 [17], 7 [25], 8 [34], 9 [44], 10 [55], 11 [72], 12 [85], 13 [106], 14 [127], 15 [151], 16 [177], 17 [199], 18 [216], 19 [246], 20 [283], 21 [333], 22 [356], 23 [372], 24 [425], 25 [480], 26 [492], 27 [553].

Le dernier progrès est daté du 19 février 2014. Il a permis de prouver que pour 27 graduations, les positions suivantes donnent la règle optimale : 0-3-15-41-66-95-97-106-142-152-220-221-225-242-295-330-338-354-382-388-402-415-486-504-523-546-553.

La théorie des graphes, dont l'essentiel des développements a moins d'un siècle, rencontre comme l'arithmétique d'étranges problèmes aux énoncés simples dont les démonstrations sont soit très longues, comme le « Théorème des mineurs » (voir cette rubrique dans *Pour la Science d'avril 2008*), soit introuvables, comme les deux conjectures que nous venons d'évoquer. Pourquoi ? C'est assez mystérieux, mais cela montre que les formalismes que nous utilisons (des axiomes et des règles pour les manipuler) et qui nous semblent puissants et généraux, sont en réalité faibles et n'accèdent efficacement qu'à la surface du monde mathématique.

L'AUTEUR



J.-P. DELAHAYE est professeur émérite à l'université de Lille et chercheur

au Centre de recherche en informatique, signal et automatique de Lille (CRISTAL).

BIBLIOGRAPHIE

Wikipédia, Règles de Golomb (consulté en mai 2016) : https://fr.wikipedia.org/wiki/Règle_de_Golomb

D. Anick, Counting graceful labelings of trees : A theoretical and empirical study, *Discrete Applied Mathematics*, vol. 198, pp. 65-81, 2016.

J. Gallian, A Dynamic Survey of Graph Labeling, 2015 : www.combinatorics.org/ojs/index.php/eljc/article/view/DS6/pdf

M. M. Al Aziz et al., Graceful labeling of trees : Methods and applications, 17th International Conference on Computer and Information Technology (ICIT), 2014 (<http://bit.ly/2a8ewoG>).

K. Drakakis, A review of the available construction methods for Golomb rulers, *Advances in Mathematics of Communications*, vol. 3(3), pp. 235-250, 2009.



Retrouvez la rubrique Logique & calcul sur www.pourlascience.fr

SCIENCE & FICTION

L'imaginaire à la carte

Les cartes de mondes fictifs rivalisent parfois de réalisme avec celles de régions terrestres bien réelles. Elles fourmillent de détails et racontent, à leur façon, une part de l'histoire de leur univers.

Jean-Sébastien STEYER et Roland LEHOUCQ

Illustration : Marc BOULAY

Dans la version française de l'encyclopédie Wikipédia, la description géographique du continent de Westeros est plus longue et détaillée (plus de 6 000 mots) que celle du Danemark (3 724 mots seulement), où vivent également des monarques ou des princesses. La différence est que Westeros est un lieu imaginaire tiré des romans de George R. R. Martin, adaptés à la télévision avec la série *Game of Thrones*. La carte de ce monde, minutieusement décrite dans le générique de chaque épisode, plante le décor où se déroule l'action et renforce la crédibilité de cette fiction. C'est un procédé classique dans les histoires médiévales-fantastiques : déjà en 1937, dans son premier roman *Bilbo le Hobbit*, John R. R. Tolkien avait lui-même dessiné la carte de la Terre du Milieu. Ce continent devenu mythique est aussi le siège de l'action du *Seigneur des Anneaux* (1954-1955).

Les cartes, ces « outils géographiques par excellence », pour reprendre l'expression du géographe Jean-Benoît Bouron, définissent des lieux, qu'ils soient réels ou imaginaires. Outre les informations souvent multiples qu'elles délivrent – topographiques mais aussi climatiques, écologiques, géologiques, géopolitiques, etc. – les cartes racontent leurs propres histoires.

En 1992, William Sarjeant, professeur de géologie à l'université du Saskatchewan, au Canada, s'est appuyé sur la carte et les écrits de Tolkien pour reconstruire l'histoire géolo-



© Pocket, un département d'Univers Poches pour la présente édition.

JOHN R. R. TOLKIEN a lui-même dessiné la carte du monde où évoluent les personnages du *Seigneur des Anneaux* et de *Bilbo le Hobbit*. Cette carte, avec ses nombreux détails, rappelle celles dressées par les grands explorateurs du XV^e et du XVI^e siècles.

gique de la Terre du Milieu ! Avec ses monstres et ses sirènes soigneusement dessinés dans les mers, sa rose des vents très élaborée ainsi que son style graphique tiré des mappemondes des siècles des grandes découvertes, cette carte témoigne des inspirations tantôt médiévale, tantôt art nouveau ou même folklorique de l'auteur, qui était professeur de philologie à l'université de Leeds. Les toponymes utilisés – tel The Shire (le Comté, où vivent les Hobbits) – trahissent aussi l'affiliation britannique de Tolkien (les mêmes Hobbits sont d'ailleurs souvent vus comme des caricatures de la bourgeoisie anglaise).

La carte de l'île mystérieuse du roman éponyme de Jules Verne (1875) présente des toponymes très évocateurs : promontoire du Reptile, golfe du Requin, caverne des Jaguars. Les figurés sont conventionnels pour l'époque : les reliefs y sont symbolisés par des tirets (dont la densité est proportionnelle à la pente), des ondes de vagues s'étirent le long des côtes, les plages et les dunes sont représentées par des pointillés et les forêts par des figurés moutonneux. Cette représentation imaginaire semble directement inspirée de la carte des îles Auckland, un archipel bien réel situé au sud de la Nouvelle-Zélande, et dont l'exploration des terres désolées n'était pas inconnue de Jules Verne.

Mais alors comment démêler le vrai du faux ? Il n'est parfois pas évident de reconnaître une géographie imaginaire : leurs auteurs prennent soin d'utiliser des codes graphiques bien adaptés pour brouiller les



LA CARTE D'UN MONDE IMAGINAIRE
regorge de détails qui rendent crédibles cet univers, sa géographie, son climat, sa géologie et l'histoire de ses habitants.

pistes. On pourrait dire que les cartes fictives présentent souvent des *terrae incognitae*, c'est-à-dire des zones blanches laissées vierges pour permettre à la trame de se dérouler, aux personnages d'évoluer, ou tout simplement à l'imaginaire de se mettre en branle. Mais n'est-ce pas aussi le cas de nos cartes bien réelles ? Même à l'heure des satellites qui quadrillent notre planète, la carte géologique de l'Antarctique, par exemple, présente encore des zones inconnues, les géologues ne pouvant se rendre sur place pour vérifier leurs hypothèses (la glace empêche tout échantillonnage rocheux). Il en est de même avec la carte des fonds marins, dont 75 % des zones très profondes demeurent inexplorées.

Explorées, les *terrae incognitae* reculent petit à petit et les cartes s'enrichissent. La cartographie n'est donc pas un domaine figé, mais en perpétuelle évolution. D'ailleurs, les premières mises en forme scientifiques de données cartographiques remontent à Ptolémée (II^e siècle). C'est lui qui, le premier, a formulé des principes de projection : « Il serait bon de conserver droites les lignes qui représentent les méridiens et de représenter les parallèles de latitude par des arcs de cercle dessinés autour d'un même centre. »

Si les cartes forment d'excellents supports pour illustrer et décrire les mondes fictifs en littérature, elles sont aussi utilisées en bande dessinée et au cinéma. La carte du monde d'Aldébaran, dessinée par Leo, permet de suivre les aventures de colons

humains fraîchement débarqués sur cette planète imaginaire. Dans *Star Wars*, les plans de l'Étoile Noire (*Épisode III*) et la carte menant à Luke Skywalker (*Épisode VII*) sont même au cœur de l'action !

Des villes-planètes aux défis de l'urbanisation

Le géographe Alain Musset s'est penché, toujours dans le monde de *Star Wars*, sur la cartographie de Coruscant, une ville couvrant toute une planète. Il note que cette cité démesurée et remplie de gratte-ciel présente une structure verticale où les classes sociales sont marquées par des inégalités vertigineuses. Selon lui, ce schéma, très classique, des œuvres dépeignant des mégapoles hypermodernes (très présentes dans le genre cyberpunk notamment), résulterait d'inquiétudes bien réelles liées à l'urbanisation galopante – et ses problèmes sociaux inhérents – de certaines régions du monde (rappelons que 54 % de la population mondiale est aujourd'hui concentrée dans des zones urbaines).

Simple illustration renforçant la fiction, décor vivant, ou encore lieu d'action, la carte est aussi au cœur des jeux de rôle (jeux de plateau et jeux vidéo). Ainsi, la carte de Laelith, grande cité médiévale-fantastique imaginée dans les années 1980 par l'équipe du magazine *Casus Belli*, a servi de base à de nombreux scénarios, notamment pour le jeu *Donjons & Dragons*. Notons que cette

carte intègre astucieusement des données géologiques, car la cité en question est construite en pente, sur un grand plan qu'un basculement tectonique a incliné.

La limite entre réalité et fiction est encore plus ténue lorsque des lieux bien réels deviennent espaces fictionnels. Dans *L'Appel du Cthulhu*, autre jeu issu de l'univers anxigène de l'écrivain Howard P. Lovecraft, certaines parties se déroulent sur une carte de Londres à l'époque victorienne. Enfin, dans *Sables rouges*, jeu de rôle de science-fiction (du genre postapocalyptique), les scénarios reposent sur une carte réelle de la planète Mars éditée par la Nasa !

Si la cartographie est une discipline relevant des sciences dites exactes car elle mesure, analyse et tente de représenter des données souvent quantitatives dans des espaces donnés, la géographie n'en demeure pas moins une science humaine qui assume pleinement sa dimension subjective.

Et si des cartes imaginaires peuvent ressembler à des mondes bien réels, l'inverse est également vrai. L'espace décrit en géographie varie suivant les projections et les points de vue : par exemple, la carte de la Terre avec la projection de Spilhaus, centrée sur le pôle Sud, fait apparaître les océans au centre du monde et nous ferait presque croire que nous vivons sur une autre planète ! ■

Jean-Sébastien STEYER est paléontologue au CNRS-MNHN, à Paris. Roland LEHOUCQ est astrophysicien au CEA, à Saclay. Marc BOULAY est sculpteur numérique.

ART & SCIENCE

Des fleurs incandescentes dans le ciel

Les feux d'artifice sont indissociables de maintes festivités.

Cette tradition millénaire associe l'art des artificiers

à la science des chimistes... pour le plus grand bonheur de nos yeux.

Loïc MANGIN

Du 14 juillet 2016, on préférera ne retenir que les éblouissantes fleurs colorées qui illuminèrent le ciel une fois la nuit tombée : les feux d'artifice. Ils nous ont fait redresser la tête et écarquiller les yeux devant l'art des artificiers, un art millénaire auquel la science a prêté main-forte pour le rendre encore plus spectaculaire.

Tout commence en Chine, sous la dynastie des Tang, qui a régné du VII^e au début du X^e siècle. C'est là que sont nées les quatre grandes inventions qui allaient révolutionner le monde : la boussole, le papier, l'imprimerie et, celle qui nous intéresse ici, la poudre à canon. Ce mélange de salpêtre, de soufre et de charbon de bois est détonnant ! La moindre étincelle conduit à sa combustion rapide, qui se traduit par une déflagration. Outre son usage militaire, cette mixture a aussi été très tôt utilisée lors de festivités sous la forme de feux d'artifice. Ce sont les débuts de la pyrotechnie, dont les spécialistes, en Chine ancienne, étaient très respectés.

Cette technique et ce savoir-faire seront ensuite transmis aux Arabes, qui parlaient de « fleurs chinoises », dès le XIII^e siècle, puis aux Européens au XVII^e siècle. En 1747, la nouvelle édition du *Traité des feux d'artifice pour le spectacle*, d'Amédée François Frézier (la version originale datant de 1706), contribua au lancement de la mode des feux d'artifice en Occident, portée par l'engouement de l'époque pour l'Extrême-Orient.

Les feux d'artifice sont vite devenus indispensables aux grandes fêtes. Ainsi, le 15 mai 1749, un spectacle pyrotechnique impressionnant est donné à Londres (*cartouche page ci-contre*). Il s'agit de célébrer le roi George II de Grande-Bretagne et la signature un an plus tôt du traité d'Aix-la-Chapelle, qui marquait la fin de la guerre de la Succession en Autriche, au cours de laquelle la poudre à canon a beaucoup parlé.

Pour l'occasion, Georg Friedrich Haendel compose sa *Music for the Royal Fireworks* (« Musique pour les feux d'artifice royaux »). Hélas, pendant la représentation, une étincelle

Le Traité des feux d'artifice pour le spectacle, d'Amédée François Frézier, contribua à la mode des feux d'artifice en Occident

met le feu au *Temple de la Paix*, un pavillon qui abrite plusieurs milliers de fusées d'artifice, et fait trois victimes parmi les spectateurs...

Aujourd'hui, la sécurité s'est beaucoup améliorée, notamment grâce à une meilleure maîtrise des mécanismes en jeu. Quel que soit le résultat dans le ciel, ils sont similaires. Une fusée, le plus souvent une sphère en papier, est placée dans un canon en acier ou en carton, d'où elle s'élance sous l'impulsion de la déflagration d'une première charge de poudre (la chasse) allumée par une mèche. Une autre, nommée espolette, prend le relais et transmet la flamme à la charge centrale,

dite d'éclatement, au cœur de la boule dont la périphérie est tapissée d'« étoiles ». Ces dernières sont de petits agrégats de substances pyrotechniques que l'explosion portera à très haute température et projettera vers l'extérieur : c'est le feu d'artifice, dont la forme (en fleur, en anneau...) dépend de l'agencement des « étoiles » dans la fusée.

Le salpêtre de la poudre originelle a été remplacé par un composé oxydant, du nitrate ou du perchlorate, qui libère de l'oxygène. Le soufre et le carbone (substances réductrices qui servent de combustible) sont mélangés à des composés qui deviennent incandescents au moment de l'explosion.

Les couleurs sont une question de chimie. Dans les étoiles ou dans la charge d'éclatement, des dérivés du strontium, du calcium, du cuivre, du bore et du sodium se traduisent par une lumière respectivement rouge, orange, bleue, verte et jaune. La température est aussi essentielle : selon qu'elle est très élevée ou non, les composés à base d'aluminium ou de magnésium donneront une lumière argentée ou blanche.

Si vous avez raté les feux d'artifice de juillet, deux rendez-vous d'envergure sont prévus en septembre pour vous rattraper. Sinon, sachez que l'airbag de votre voiture se déclenche aussi par un mécanisme pyrotechnique... ■

.....
Le spectacle du Groupe F, dans le cadre des Grandes Eaux nocturnes du Château de Versailles, jusqu'au 17 septembre ; « le plus grand feu d'artifice d'Europe » au Domaine national de Saint-Cloud (92), le 10 septembre.



Le monde change, la santé aussi.



Un des principaux acteurs de la médecine d'aujourd'hui prend la plume pour donner le cap d'une politique de santé adaptée au monde - et au patient - de demain.



Laurent Degos - 160 p. - 13 €



Retrouvez toutes nos nouveautés sur notre site
www.editions-lepommier.fr



IDÉES DE PHYSIQUE

Des fluides sens dessus dessous

Pourquoi un verre d'eau tenu à l'envers se vide-t-il, en dépit de l'opposition de la pression atmosphérique ? Parce qu'un liquide dense reposant sur un fluide plus léger constitue un système en équilibre instable.

Jean-Michel COURTY et Édouard KIERLIK

Une boisson contenue dans une paille verticale dont l'extrémité supérieure est bouchée ne s'écoule pas. Il est en revanche impossible de conserver cette même boisson dans un verre renversé et vertical. Pourquoi ? La réponse réside dans l'« instabilité de Rayleigh-Taylor », qui perturbe l'interface de deux fluides lorsque le fluide du dessus est plus dense que le fluide du dessous. Cette instabilité est visible autour de nous dans les bouteilles percées, les verres retournés, les « lampes à lave » ou les magnifiques marbrures des « peintures accidentelles » de l'artiste mexicain (et politiquement très engagé) David Alfaro Siqueiros (1896-1974).

Verre retourné, chute d'eau assurée

Commençons par une expérience. Versons de l'eau dans un verre sans le remplir entièrement, recouvrons l'ouverture d'une feuille de papier cartonné et retournons l'ensemble, tête en bas, en maintenant le papier cartonné pour que l'eau ne s'écoule pas. Lorsque la feuille de carton est à nouveau à l'horizontale, lâchons-la. Au lieu de tomber, celle-ci reste comme collée au verre et le contenu liquide ne s'écoule pas (voir la figure ci-contre). Comment l'expliquer ?

Tout est affaire de pression. Initialement, l'air qui surmonte l'eau dans le verre est à la pression atmosphérique. La pression au fond du verre est donc égale à cette pression

additionnée de la pression hydrostatique correspondant à la hauteur de la colonne d'eau. Supposons que celle-ci soit d'environ 5 centimètres. La pression hydrostatique vaut alors 0,5 % de la pression atmosphérique (dans l'eau, la pression augmente de 1 atmosphère quand on s'enfonce de 10 mètres).

Lorsque le verre est renversé et qu'on lâche la feuille, la pression s'exerçant sur cette dernière dépasse donc légèrement la pression atmosphérique. L'ensemble eau-feuille se met alors à chuter en bloc. Ce faisant, le volume d'air dans le verre augmente, sa pression diminue et lorsque celle-ci

a diminué de 0,5 %, la pression au niveau de la feuille devient égale à la pression atmosphérique : la chute cesse. Si la hauteur d'air au-dessus de l'eau est de 1 centimètre, on calcule facilement que l'ensemble eau-feuille descend de un vingtième de millimètre : une chute imperceptible.

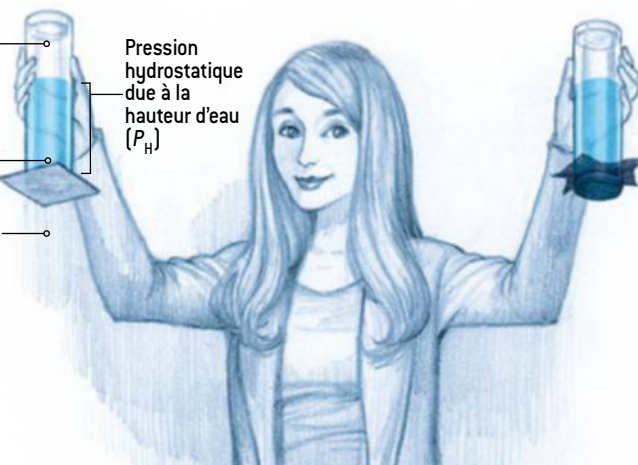
Que se passe-t-il maintenant si nous enlevons rapidement le papier cartonné en le tirant horizontalement ? Tout ce que nous avons dit précédemment laisserait penser que l'eau peut rester dans le verre : comme, à la suite de la minichute, la pression à l'interface air-eau est la même dans l'air et dans

Pression de l'air enfermé : $P_0 - P_H$

Pression au bas de la colonne : $(P_0 - P_H) + P_H = P_0$

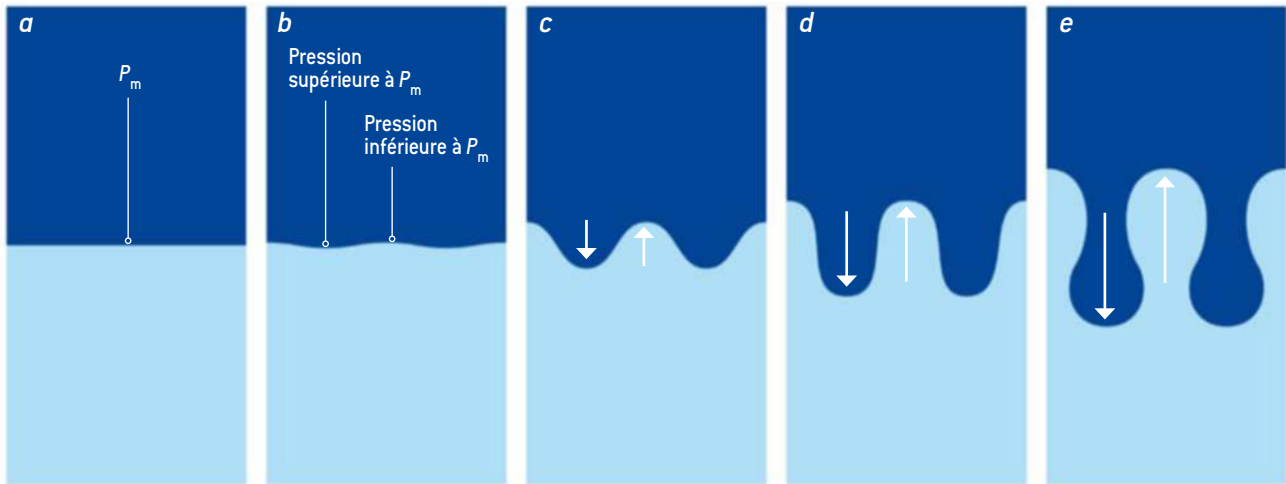
Pression atmosphérique (P_0)

Pression hydrostatique due à la hauteur d'eau (P_H)



LE CONTENU LIQUIDE D'UN VERRE RENVERSÉ et dont l'ouverture est recouverte par une feuille cartonnée (à gauche) ou par de la gaze ou un grillage fin (à droite) ne se déverse pas. En revanche, si l'on retire la feuille cartonnée ou la gaze, malgré l'équilibre initial des pressions, l'interface liquide-air se déstabilise très rapidement et le liquide tombe.

Dessins de Bruno Vacaro



L'INSTABILITÉ DE RAYLEIGH-TAYLOR

porte sur l'interface de deux fluides de densités différentes, le fluide le plus dense (*en bleu foncé*) étant posé au-dessus de l'autre (*en bleu clair*). Même si, initialement, l'interface est parfaitement plane et horizontale (*a*), de minuscules fluctuations sont inévitables (*b*). Là où il y a un creux, la pression du fluide du dessus est supérieure à la pression médiane P_m , de sorte que le creux s'amplifie ; de la même façon, la pression dans les bosses étant inférieure à la pression médiane, les bosses grossissent (*c*). L'interface se déstabilise et les deux fluides s'interpénètrent (*d, e*).

l'eau en tout point de la surface, l'équilibre mécanique semble en effet assuré. Pourtant, l'expérience nous montre que cet équilibre est instable : l'eau se déverse ! En revanche, si l'on effectue l'expérience en remplaçant la feuille cartonnée par un grillage fin, un tissu ou une gaze tendue, l'équilibre persiste.

Pour le comprendre, imaginons que l'interface horizontale entre deux fluides soit déformée par de très légères ondulations, d'amplitude $+A$ ou $-A$ par rapport à un niveau médian. Le fluide le plus dense (l'eau par exemple), de densité ρ_1 , surmonte le second fluide (l'air par exemple) de densité ρ_2 (avec $\rho_1 > \rho_2$).

Dans les creux par rapport à la médiane horizontale, la hauteur de la colonne de fluide dense est augmentée de A : la pression hydrostatique y augmente de la quantité $(\rho_1 - \rho_2)gA$ par rapport à la pression médiane, g étant l'accélération de la pesanteur. Dans les bosses, c'est le contraire : la pression diminue de la même quantité. Il s'ensuit que dans les creux, l'interface est repoussée vers le bas, tandis que dans les bosses elle est aspirée vers le haut. Autrement dit, les ondulations s'amplifient, ce qui déstabilise l'interface (voir la figure ci-dessus) : c'est l'instabilité de Rayleigh-Taylor, nommée ainsi d'après les physiciens anglais John Rayleigh (1842-1919) et Geoffrey Taylor (1886-1975) qui en ont déterminé les caractéristiques.

Comment se fait-il que, dans l'expérience utilisant un grillage fin pour contenir l'eau du verre, l'interface air-eau reste stable ?

On a ici un mécanisme stabilisateur : la tension de surface, qui s'oppose à toute augmentation de l'aire d'une interface. Lorsque la surface n'est pas plane, cette tension superficielle engendre des surpressions dans les parties concaves par rapport aux parties convexes, ce qui favorise les déplacements de fluide susceptibles d'aplanir l'interface (c'est comme si l'interface était une surface élastique).

La tension de surface, un facteur stabilisant

Ces surpressions ne contrebalancent les effets de pression hydrostatique que si la taille caractéristique de l'ondulation ou de la perturbation de l'interface est inférieure à la longueur dite capillaire. Dans le cas de l'interface air-eau, cette dernière vaut de l'ordre de 3 millimètres. En pratique, cela signifie que si un orifice a un diamètre inférieur à cette longueur, la tension de surface domine et l'interface est stable, tandis que si l'orifice a un diamètre supérieur, la gravité l'emporte, l'instabilité de Rayleigh-Taylor se développe et l'interface est instable.

Accessoirement, c'est aussi la tension de surface qui évite que l'eau ne s'écoule à travers le petit interstice formé entre la feuille cartonnée et le rebord du verre lors de notre première expérience.

Une fois l'instabilité déclenchée, la suite des événements dépend de nombreux paramètres, dont notamment la viscosité



Retrouvez la rubrique
Idées de physique sur
www.pourlascience.fr

des fluides et leur tension interfaciale. La pénétration d'un fluide dans l'autre peut se faire sous la forme de « doigts » qui s'élèvent pour l'un, plongent pour l'autre. Éventuellement, ces doigts se transforment en panaches ressemblant à des champignons, ou se détachent et forment des bulles.

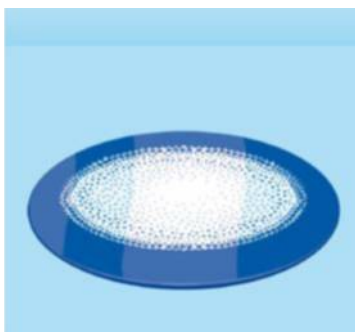
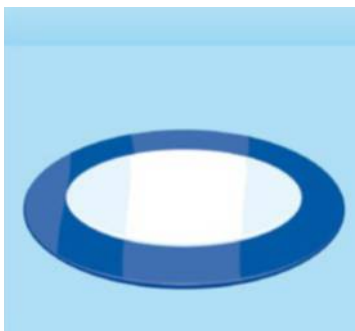
C'est ce que l'on observe dans les lampes à lave, qui étaient à la mode dans les années 1970. Dans un tel objet à température ambiante, un mélange d'huiles minérales, de paraffine et de tétrachlorure de carbone est surmonté d'eau. Le tout se trouve au-dessus d'une lampe. Quand la lampe est éteinte, l'interface des deux fluides est parfaitement horizontale.

Lorsqu'on allume la lampe, l'échauffement dilate plus fortement le fluide du dessous. Il devient alors moins dense, l'instabilité de Rayleigh-Taylor se déclenche et le fluide s'élève lentement, sous la forme de grosses bulles mues par la poussée d'Archimède. Arrivé dans le haut de la lampe, le fluide se refroidit, gagne en densité et retombe jusqu'en bas, puis le cycle recommence.

Les œuvres de David Alfaro Siqueiros offrent un autre exemple où l'instabilité de Rayleigh-Taylor joue un rôle capital. L'artiste mexicain a inventé en 1936 une technique qu'il appela « peinture accidentelle ».

Sur une toile horizontale, on verse une première peinture, qu'on laisse s'étaler progressivement jusqu'à une épaisseur de 1 à 2 millimètres. Puis, sur cette première couche, on en verse une seconde, de teinte différente et, surtout, un peu plus dense. Cette dernière commence par recouvrir la première couche, mais, au bout de quelques dizaines de secondes, sous l'effet de l'instabilité de Rayleigh-Taylor, on voit la première couleur réapparaître en formant des motifs aléatoires qui grossissent puis se figent lorsque la peinture sèche (voir la figure ci-contre).

L'analyse et les mesures des physiciens ont confirmé les tailles caractéristiques de ces motifs, qui dépendent notamment des densités des fluides et de leur tension de surface – mais ces études n'élucident évidemment pas la puissance esthétique des œuvres telles que *Collective suicide* ou *Birth of fascism*. ■



LES « PEINTURES ACCIDENTELLES »

de l'artiste mexicain David Alfaro Siqueiros étaient réalisées en déposant, sur une première couche de peinture, une seconde couche d'une peinture de teinte différente et de densité un peu supérieure.

Au bout de quelques instants, l'instabilité de Rayleigh-Taylor se développe : la peinture de la couche inférieure remonte par endroits en dessinant des taches dans la couche du dessus, et ces motifs se figent à mesure que la peinture sèche.

■ LES AUTEURS



Jean-Michel COURTY et Édouard KIERLIK sont professeurs de physique à l'université Pierre-et-Marie-Curie, à Paris. Leur blog : www.scilogs.fr/idees-de-physique

■ BIBLIOGRAPHIE

S. Zetina et al., A hydrodynamic instability is used to create aesthetically appealing patterns in painting, *PLoS One*, vol. 10(5), e0126135, 2015 [<http://dx.doi.org/10.1371/journal.pone.0126135>].

D. H. Sharp, An overview of Rayleigh-Taylor instability, *Physica D*, vol. 12, pp.3-18, 1984.

QUESTION AUX EXPERTS

La France détient-elle une partie de l'Antarctique ?

Malgré des revendications, aucun État ne possède de territoire en Antarctique. En fait, l'exploitation économique du continent austral est... gelée jusqu'en 2048 !

Pierre JOUVENTIN

L'Arctique, au nord, est de la banquise flottant sur l'océan. L'Antarctique, au sud, est en revanche un continent plus grand que l'Europe. En hiver, sa superficie double du fait de la glace de mer qui l'entoure. Malgré sa forme circulaire et des revendications territoriales qui lui donnent, dans certains ouvrages, l'aspect d'un gâteau ou d'un camembert découpé en portions, aucun pays n'en possède de part depuis la signature du traité sur l'Antarctique entré en vigueur en 1961. Cependant, les techniques ont fait de tels progrès que cet enfer climatique est devenu en partie exploitable, ce qui tend à faire resurgir les revendications territoriales.

Étant recouverte de glaces sur une épaisseur moyenne de plus de 2 000 mètres, l'Antarctique a longtemps paru sans intérêt. De fait, seulement 2 % de la surface du sol est visible durant l'été austral. Dans la péninsule antarctique, plus proche des terres habitées, le climat est moins extrême qu'au centre (où l'on a frôlé les -90°C). Des indices de pétrole y ont été trouvés et trois pays revendiquent ce territoire. L'Argentine et le Chili y envoient même des couples dont la femme accouchera sur place, ce qui crée des natifs pour étayer les prétentions territoriales... Certaines stations, qui pullulent sur la péninsule Antarctique, ne sont d'ailleurs scientifiques qu'en théorie.

Les revendications territoriales de chaque État sont fondées sur ses voyages d'exploration. C'est la raison pour laquelle la France

pourrait un jour avoir des droits sur la terre Adélie, découverte le 22 janvier 1840 par l'amiral Jules Dumont d'Urville, qui l'a baptisée du prénom de son épouse, Adèle. Il en revint sain et sauf avec son équipage pour décéder deux ans plus tard dans le premier accident ferroviaire français. Le rocher sur lequel les explorateurs débarquèrent se trouve maintenant à quatre kilomètres de la côte, un décalage peut-être dû au réchauffement climatique, dont l'origine humaine a été mise en évidence notamment grâce à l'analyse des gaz emprisonnés dans les glaces antarctiques.

Deux bases permanentes françaises

La terre Adélie, revendiquée par la France, constitue aujourd'hui un secteur délimité par six degrés de longitude. Elle abrite l'une des deux bases permanentes gérées par l'Institut français pour la recherche et la technologie polaire (l'IFRTP, basé à Brest et dépendant du CNRS). Nommée Dumont-d'Urville, cette base est le paradis des sciences de la vie, car elle a été construite sur un archipel où, en été, les animaux polaires se reproduisent (sauf le manchot empereur qui choisit la plus mauvaise saison, mais dont une colonie se trouve à quelques centaines de mètres).

L'autre base, Concordia, est installée à l'intérieur du continent, à un endroit où des forages profonds de glace ancienne sont possibles. Beaucoup plus récente, elle est



© Wikimedia Commons/TUBS

consacrée aux sciences physiques et climatologiques. Cet effort porte ses fruits, puisque, grâce au travail accompli sur le continent blanc, les recherches françaises en glaciologie, en océanographie et en biologie animale sont parmi les plus avancées du monde.

Dans les années 1980, la pression des industriels américains se faisant de plus en plus grande, l'exploitation des ressources minérales de ce continent fut sur le point d'être décidée. La France a entraîné les autres pays et a permis d'obtenir, avec l'aide de l'Australie, un moratoire. Signé le 4 octobre 1991, le protocole de Madrid est entré en vigueur le 14 janvier 1998. Il gèle pour cinquante ans les richesses antarctiques, donc jusqu'en 2048. Expert en biologie de la délégation française pendant ces tractations, j'ai pu constater que la passion pour les pôles du Premier ministre de l'époque, Michel Rocard, n'a pas été pour rien dans le succès d'une vaste opération diplomatique faisant de l'Antarctique une « terre de paix et de science ».

Pour l'heure, la principale menace pesant sur le milieu antarctique n'est pas son exploitation industrielle, mais la fréquentation touristique qui augmente chaque année. En vingt-cinq ans, le nombre annuel de visiteurs est passé de moins de 5 000 à plus de 37 000. Une fréquentation multipliée par huit... ■

Pierre JOUVENTIN, éthologue émérite, a dirigé durant près de quinze ans le laboratoire d'écologie du CNRS à Chizé.

ABONNEZ-VOUS À **POUR LA SCIENCE**

**OFFRE
DÉCOUVERTE**
59€

12 N^{OS} POUR LA SCIENCE



**VOTRE
RÉDUCTION**

24%

**OFFRE
PASSION**
79€

12 N^{OS}
POUR LA SCIENCE
+ 4 HORS-SÉRIES



+



**VOTRE
RÉDUCTION**

27%

**OFFRE
INTEGRALE**
99€

12 N^{OS}
POUR LA SCIENCE
+ 4 HORS-SÉRIES
+ ACCÈS
AUX ARCHIVES
DEPUIS 1996



+



+



**VOTRE
RÉDUCTION**

43%

BULLETIN D'ABONNEMENT

**POUR LA
SCIENCE**

À renvoyer accompagné de votre règlement à : Pour la Science - Service abonnements - 19 rue de l'Industrie - BP 90 053 - 67 402 Illkirch cedex

OUI, je m'abonne à Pour la Science et je choisis la formule :

■ J'indique mes coordonnées :

PAS467

Nom : _____ Prénom : _____

Adresse : _____

CP : _____ Ville : _____

Tél. Pour le suivi client (facultatif) : _____

■ Mon e-mail pour recevoir la newsletter Pour la Science (à remplir en majuscule).

@

Grâce à votre email nous pourrions vous contacter si besoin pour le suivi de votre abonnement. À réception de votre bulletin, comptez 5 semaines pour recevoir votre n° d'abonné. Passé ce délai, merci d'en faire la demande à pourlascience@abopress.fr

J'accepte de recevoir les informations de Pour la Science ☐ OUI ☐ NON et de ses partenaires ☐ OUI ☐ NON

■ Je choisis mon mode de règlement :

☐ Par chèque à l'ordre de Pour la Science

☐ Par carte bancaire - N° : _____

Date d'expiration : _____ Clé (Les 3 chiffres au dos de votre CB) : _____

Signature obligatoire

☐ **OFFRE INTÉGRALE**
12 N^{OS} POUR LA SCIENCE
+ 4 HORS-SÉRIES
+ ACCÈS AUX ARCHIVES DEPUIS 1996
99€
au lieu de 173,50€

PIA99E

☐ **OFFRE PASSION**
12 N^{OS} POUR LA SCIENCE
+ 4 HORS-SÉRIES
79€
au lieu de 108,50€

PIA79E

☐ **OFFRE DÉCOUVERTE**
12 N^{OS} POUR LA SCIENCE
59€
au lieu de 78,50€

PIA59E

Délai de livraison: dans le mois suivant l'enregistrement de votre règlement. Offre réservée aux nouveaux abonnés, valable jusqu'au 30/09/16 en France métropolitaine uniquement. Pour un abonnement à l'étranger, merci de consulter notre site www.pourlascience.fr. Conformément à la loi "Informatique et libertés" du 6 janvier 1978, vous disposez d'un droit d'accès et de rectification aux données vous concernant en adressant un courrier à Pour la Science.

SCIENCE & GASTRONOMIE

En bouche, le vin change

La salive modifie l'évaporation des composés odorants des vins.

Hervé THIS

Plus que pour les autres aliments, l'odeur des vins est essentielle, au point que l'on a introduit un mot pour la désigner : le bouquet. Avec la couleur, c'est le premier paramètre que perçoit le gourmet et qui oriente son appréciation.

Cette odeur est due à des molécules odorantes, dont la libération varie avec la température, la forme du verre... En bouche, cette odeur se fait sentir une seconde fois, mais différemment, parce que la température du vin change, et aussi parce que les composés du vin interagissent avec ceux de la salive. Ainsi, certains composés phénoliques se lient aux protéines salivaires, au point qu'une gorgée d'un vin tannique mâchée puis recrachée laisse apparaître des précipités. Or Carolina Muñoz-González et ses collègues, à Madrid et à Dijon, ont récemment étudié les interactions de la salive avec les molécules odorantes des vins.

La salive contient des protéines, de l'eau et des ions (sodium, calcium, potassium, chlorure, phosphate et bicarbonate). Parmi les protéines figurent des mucines, des protéines riches en résidus d'acides aminés histidine, proline, etc., mais aussi des enzymes : amylases (qui coupent l'amylase, par exemple de l'amidon), lipases (qui décomposent les triglycérides des matières grasses), protéases (qui décomposent les protéines).

Les études de divers systèmes avaient montré des résultats contradictoires. Par exemple, on avait mesuré que la salive réduisait la libération de molécules odorantes pour les gels de pectines que sont les confitures, pour les poivrons ou les haricots verts, mais

on avait aussi observé que cette libération était augmentée pour des émulsions de type mayonnaise, ou qu'elle n'est pas modifiée pour des fromages, par exemple.

Les chimistes espagnols et français ont étudié des salives réelles et des salives reconstituées, mais aussi des vins réels et des vins reconstitués, dont ils pouvaient varier la composition, notamment en composés odorants. Mieux, certains des vins reconstitués étaient obtenus par élimination des composés odorants, puis ajout de composés odorants spécifiques (afin de conserver la « matrice » des vins), tandis que d'autres étaient des solutions d'eau, d'éthanol et d'acide tartrique.

Élucider les interactions salive-vin pour créer des vins personnalisés ?

Quant à la salive réelle, elle provenait de volontaires sains qui n'avaient pas consommé d'aliment ou d'eau dans l'heure qui avait précédé la collecte. La salive artificielle, elle, était préparée à partir d'eau, de sels minéraux et de mucine.

Les divers liquides étaient mélangés soit de façon statique, soit dans un bioréacteur thermostaté où l'on pouvait faire passer les liquides et de l'air, afin de reproduire la dégustation des vins. Enfin, les analyses étaient effectuées par chromatographie en phase gazeuse et spectrométrie de masse.

Les chimistes ont observé que l'évaporation de 37 des 45 composés odorants testés était notablement différente dans les salives artificielles ou réelles, et 33 composés



© Jean-Michel Thiriet

odorants étaient différemment libérés selon la matrice des vins. En général, cependant, les composés odorants étaient moins libérés par le mélange salive-vin que par les vins seuls.

Les chercheurs ont toutefois relevé quelques différences. Ainsi, les vins rouges semblent davantage modifiés par la salive que les vins blancs. Par ailleurs, l'ajout de salive humaine ou artificielle ne modifie pas la libération des composés odorants de la classe des alcools. Et les effets diffèrent selon qu'ils sont testés en conditions statiques (simples mélanges) ou en conditions dynamiques (en bioréacteur) : la modification de la libération est généralement moindre dans ce dernier cas.

Quand de telles études auront donné assez d'informations sur les mécanismes de libération des composés odorants des vins, on pourra envisager la production de vins de qualité pour des groupes de buveurs particuliers. En ces temps de séquençage du génome humain pour moins de 100 euros, alors que l'on envisage une « médecine personnalisée » et une « alimentation personnalisée », ne peut-on pas, aussi, imaginer des boissons adaptées à la physiologie de chacun ? ■



Hervé THIS, physicochimiste, est directeur du Centre international de gastronomie moléculaire AgroParisTech-Inra et directeur scientifique de la fondation Science & culture alimentaire (Académie des sciences).



Retrouvez la rubrique
Science & gastronomie sur
www.pourlascience.fr

Complétez votre collection !



Retrouvez tous les numéros depuis 1996 !

Commandez vos numéros sur
www.pourlascience.fr

POUR LA
SCIENCE | **ARCHIVES**



■ MATHÉMATIQUES

Comment cuire un 9 ?

Eugénia Cheng

Flammarion, 2016
[272 pages, 18 euros].

L'auteure réalise le Graal de la vulgarisation : nous faire partager son intérêt pour le sujet ardu des mathématiques. Sa technique consiste à introduire ses abstractions mathématiques par des recettes de cuisine dont la composition, à partir de denrées de base, est polymorphe, tout comme les théories mathématiques édifiées sur la base d'axiomes. Les analogies innovantes d'Eugénia Cheng nous montrent que les mathématiques sont autant une pratique qu'une dégustation.

Au cours de ce voyage en terre mathématique jusqu'aux territoires en voie de défrichement tels que la théorie des catégories, l'auteure répond d'une part aux questions que nous avons refoulées (nous croyant indigne de les poser) et d'autre part aux questions que nous aurions dû nous poser. Les paragraphes et les chapitres du livre sont si bien enroulés que la lecture est naturelle, et que l'on suit avec aisance le travail des mathématiciens à travers leur cheminement imaginatif : les concepts prennent corps et vie. C'est par notre meilleure perception de leurs qualités que les êtres mathématiques accèdent au

statut de réalité assimilée. Ainsi, les nombres négatifs, imaginaires, transcendants sont devenus aussi réels que les entiers « naturels ».

La transmission de ces acquis passe par la démonstration, le cœur des mathématiques, une démarche dont on peut regretter la rareté à l'école. L'auteure préfère la course à pied aux disciplines sportives nécessitant un gros équipement, aussi aime-t-elle les mathématiques les plus abstraites, car leur pratique ne demande que peu de matériel. Elle évoque, à partir de propriétés simples, des généralisations fructueuses. Illustrons ce propos par l'équation $X=0$, qui semble dépourvue d'intérêt, sa « solution » au sens habituel étant que le nombre X doit être nul. Or, si X est interprété comme le nombre de bonbons que l'on peut mettre dans des sacs en contenant 9 sans qu'aucun bonbon ne soit laissé pour compte, alors les valeurs possibles de X sont 0, 9, 18, etc. Si X est l'heure indiquée par notre montre, alors X vaut 0, 12, 24, etc. Les subtilités de la machinerie des équations sont contenues dans une équation aussi simple que $X=0$! Laissez-vous emmener par ce guide habile. C'est un ravissement.

Philippe Boulanger

■ MÉDECINE

Notre santé dans l'arène politique mondiale

Marc Danzon et Yves Charpak

Belin, 2016
[256 pages, 20 euros].

Ce livre se présente sous la forme d'un échange de lettres entre deux acteurs majeurs de la santé publique : Marc Danzon, médecin de santé publique et ancien directeur du bureau régional

de l'OMS pour l'Europe, et Yves Charpak, médecin épidémiologiste à la direction de l'OMS et avocat infatigable de la santé auprès des institutions de l'Union européenne et du Conseil de l'Europe.



Au-delà de l'amitié et de la connivence entre les deux hommes, ce chassé-croisé épistolaire leur permet d'exprimer, parfois de façon vive et contradictoire, en tout cas toujours passionnante, leurs ressentis respectifs face aux grandes crises sanitaires que le monde a connues ces dernières décennies. C'est aussi l'occasion de revenir sur le rôle et les limites de l'OMS face aux prises de décision des pouvoirs politiques : ces décisions n'ont pas toujours été guidées par la recherche du bien commun, ce qui n'a pas manqué de renforcer le déficit de confiance des populations, d'aggraver les dérapages récurrents de l'histoire sanitaire récente et de rendre inaudible la parole des experts et des scientifiques. C'est donc la réflexion de deux témoins et acteurs essentiels qui cherchent à tirer des conclusions de leurs actions passées pour mieux aborder l'avenir. Ils nous proposent ainsi une plongée dans les jeux internationalisés des « producteurs de risques » face à des systèmes de santé très hétérogènes et fragilisés par les contradictions et attermolements des responsables

politiques et scientifiques. Ainsi, sont notamment abordés les campagnes de vaccination, la mauvaise utilisation de l'argent public et privé, les réticences à l'étiquetage des produits et à l'information des consommateurs, les conflits d'intérêt, les problèmes de nutrition, Ebola, la santé environnementale, (polluants, perturbateurs endocriniens, impacts climatiques), mais aussi le rôle et la crédibilité des experts face aux rumeurs et aux idéologies bien plus audibles du grand public et des politiques. Derrière ces échanges, c'est l'efficacité de nos systèmes de santé qui est en questionnement.

Bernard Schmitt
CERNh, Lorient

■ ÉCOLOGIE

Oser la décroissance

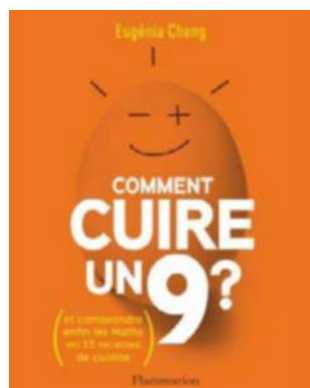
Guy Jacques

L'Harmattan, 2016
[228 pages, 23,50 euros].

En général, les savants se tiennent très prudemment éloignés de la politique. L'auteur, biologiste marin et directeur de recherche émérite au CNRS, n'a pas craint, pour sa part, de publier un livre politique au sens noble du terme, c'est-à-dire un livre engagé.

Guy Jacques a d'abord passé quarante ans, comme moi, à étudier le monde vivant dans le cadre de l'écologie scientifique avant d'écrire ce livre. C'est pourquoi il lui est difficile de considérer que les lois qui régissent tous les êtres vivants et tous les écosystèmes ne s'appliqueraient pas à notre espèce et à la Terre ! La science et la société sont donc en train de se rencontrer et c'est heureux, me semble-t-il.

« Celui qui croit qu'une croissance infinie dans un monde fini est possible est soit un fou soit un économiste », écrivait avec humour





l'économiste Kenneth Boulding en 1973. Si l'humanité continue sur sa lancée, elle consommera, en 2050, trois fois plus de matières premières qu'aujourd'hui, donc « bien au-delà de ce qui est supportable », a averti l'ONU. Comme n'importe quel écologue ou écologiste, Guy Jacques remet en cause la croissance illimitée. Ce dogme scientifique a fondé la révolution industrielle et nous ne savons plus comment en sortir, notamment sous la pression des pays en développement.

Plus original, il ose dénoncer l'explosion démographique, sujet souvent tabou. D'après les démographes, « la population mondiale croît depuis le début de l'ère industrielle encore plus rapidement que ne l'avait prévu Malthus ». Il rappelle aussi que des voix se sont élevées très tôt pour envoyer un signal d'alarme que nous n'avons pas entendu, car les avancées technologiques en plein essor les étouffaient. Dès 1780, Buffon indiquait que « la face entière de la Terre porte aujourd'hui l'empreinte de la puissance de l'homme ».

Sans parti pris électoraliste, l'auteur de ce livre aborde les problèmes de nos sociétés et les solutions proposées, le plus raisonnablement qui soit possible mais sans langue de bois, puisque l'auteur va jusqu'à critiquer vertement

les « décroissantistes ». Il n'est pas nécessaire d'être d'accord avec Guy Jacques pour le lire avec intérêt !

Pierre Jouventin

Directeur de recherche émérite
au CNRS, Montpellier

■ HISTOIRE DES SCIENCES

Une compagnie en son siècle

Pascal Griset et Valérie Greffe

Le Cherche Midi, 2015
(232 pages, 39 euros).

Voilà un très beau livre, bien écrit à quatre mains. Il retrace trois cent cinquante ans d'histoire de l'Académie française des sciences, depuis sa création par Colbert en 1666.

Sur la première période (les deux cent cinquante premières années), il expose le mouvement d'une science qui se fait, puis se montre à l'Académie même. Celle-ci est le lieu cardinal d'élaboration et de diffusion des résultats scientifiques : on pense au daguerréotype, qu'Arago promeut en 1839 comme un outil au service de l'astronomie, ou aux plaques photographiques exposées aux sels d'uranium et présentées par Henri Becquerel en 1896. C'est aussi en son sein que naît en 1835, sous l'impulsion d'Arago, l'idée de vulgarisation scientifique (avec la création des *Comptes rendus* et, surtout, l'ouverture des séances au public).

Le second mouvement, depuis les cent dernières années, est celui d'une Académie représentant la science – à partir de ce moment-là, celle-ci se fait ailleurs, dans des instituts de recherche, à l'université (enfin !), et elle s'expose dans les revues scientifiques qui se multiplient. Au XX^e siècle,

l'Académie une institution qui représente la science auprès du pouvoir politique : à cet égard, la prise de position des académiciens contre « la science allemande » en 1914-1918 (ce qu'on a appelé « la guerre des manifestes ») pourrait être un tournant, que le livre expose bien – comme il révèle sans fard une querelle moins connue, sous l'Occupation en 1940, entre le président de l'Académie (peu puissant malgré son titre) et son secrétaire perpétuel.

De nos jours, l'Académie poursuit sur cette erre d'une institution de la science participant à la vie de la nation : l'ouvrage rappelle son engagement dans la durée pour la science dans les écoles (avec *La*



Main à la pâte, depuis vingt ans) et, dans un autre registre, comment en 2014 elle s'est exprimée « de manière très polie, mais ferme » sur la politique de recherche du gouvernement.

Cet ouvrage, formé de belles pages d'histoire de la science et de son organisation, est richement illustré et documenté ; il est érudit, mais reste de lecture aisée et agréable. C'était une initiative nécessaire, puisqu'il n'y avait pas eu d'ouvrage grand public de cette qualité lors des précédents anniversaires.

Alexandre Moatti

Université Paris-Diderot

Retrouvez l'intégralité de votre
magazine et plus d'informations
sur www.pourlascience.fr



Paul Tournal, fondateur de la préhistoire

Jean Guilaïne et Chantal Alibert

Odile Jacob, 2016
(320 pages, 24,90 euros).

Une historienne et un grand savant d'origine méridionale nous présentent un grand savant méridional : Paul Tournal (1805-1872), qui fut l'un des premiers préhistoriens. Étant donné l'importance dominante des sites préhistoriques du Sud, il n'est pas étonnant que le pionnier capable d'oser introduire la notion d'« homme fossile » soit originaire du Midi. Ce Narbonnais, issu d'une famille où les fortes personnalités se succédaient, a très largement contribué à la science, géologique surtout, au journalisme, à la conservation du patrimoine...



Sur les ailes du monde, Audubon

**Fabien Grolleau
et Jérémie Royer**

Dargaud, 2016
(184 pages, 21 euros).

Jean-Jacques Audubon est le plus grand naturaliste américain que... la France ait nourri. Cette bande dessinée présente d'un point de vue naïf, mais charmant, la grande quête scientifique de cet homme des bois, qui a voué sa vie à la représentation naturaliste des oiseaux d'Amérique. Comme le souligne bien le récit, Audubon, que l'on peut considérer comme un fondateur de l'écologie américaine, avait choisi de rendre vivants ses sujets et avait aussi le talent artistique pour le faire.



La nouvelle microbiologie

Pascale Cossart

Odile Jacob, 2016
(256 pages, 23,90 euros).

Pascale Cossart, secrétaire perpétuelle de l'Académie des sciences, professeure de microbiologie à l'institut Pasteur, fait le tour de ce qui a changé dans son domaine : la microbiologie. Elle passe en revue et explique les nouveaux concepts, discute des nouvelles méthodes. Les sujets – la résistance aux antibiotiques ou la maladie de Lyme, par exemple – sont abordés par petites touches qui vont à l'essentiel.

PARCIMONIE DOGMATIQUE

P principe de parcimonie en sciences : pour rendre compte d'un phénomène, il faut introduire le moins possible de constructions auxiliaires *ad hoc*. S'ils avaient eu ce principe, les Anciens auraient-ils évité de décrire les trajectoires des planètes à l'aide de systèmes tarabiscotés de cercles tournant sur d'autres cercles ? Pas sûr. Peut-être n'ont-ils pas songé aux ellipses parce que, dogmatiques, ils voulaient que les planètes se meuvent selon des cercles.

Le principe de parcimonie ne protège pas du dogmatisme. Il y a peu, on croyait que chaque trait d'un organisme correspondait à un gène. La formule « Tout vient des gènes » est d'une séduisante parcimonie, mais elle semble n'avoir été qu'un dogme. Il est également parcimonieux d'établir des parallèles entre les phénomènes biologiques et l'informatique (comparer l'ADN à un programme, ou le cerveau à un ordinateur), mais, si la biologie est d'une nature autre que l'informatique, systématiser de tels rapprochements relève du dogmatisme.

En politique, la parcimonie peut inspirer des dogmes pernicieux. Tenir tous les colonisés pour des primitifs retardés, comme faisait le colonisateur occidental du XIX^e siècle, est plus parcimonieux qu'admettre que chaque peuple a une spécificité. Et de nos jours, une « théorie » très parcimonieuse attribue une seule cause à toutes les vilenies qui se produisent dans le monde : le complot américano-sioniste.

Accuser le principe de parcimonie en sciences d'inciter au dogmatisme en politique serait absurde. J'ai évoqué la politique en tant que miroir grossissant. C'est que du principe à l'idée préconçue, il n'y a pas

loin. S'efforcer de penser sans principe, avec une naïveté renouvelée face à chaque situation, est peut-être plus exigeant, et plus fructueux.

ÉCLAIRAGES SUR L'ÉCLAIRAGE ?

L'expression « éclairer un problème » est mal venue. Au mieux, on éclaire une partie des gens qui se le posent. En démontrant le théorème de Fermat, Andrew Wiles a éclairé non pas le problème, dont la difficulté reste immense, mais les rares spécialistes capables de saisir sa démonstration. Les autres ignoreront toujours pourquoi le théorème est vrai.



« Éclairer un problème » est une image qui suppose une extériorité du problème par rapport à ceux qui l'examinent. En fait, il existe et évolue dans leur tête. Les points de vue changeant selon les époques, les solutions sont moins définitives qu'elles n'en ont l'air sur le coup. Sans doute nos successeurs, désireux d'avoir leur propre éclairage sur le théorème de Fermat, considéreront-ils le travail d'Andrew Wiles comme un jalon plutôt que comme un terminus. Aujourd'hui encore, on s'ingénie à trouver de nouvelles démonstrations, donc de nouvelles interprétations, à l'antique théorème de Pythagore. Preuve que nous ne sommes pas complètement éclairés dessus.

LE CULTE DE L'AUTEUR CULTE

Un grand écrivain. Un écrivain considéré comme le plus prometteur de sa génération. Un classique des temps modernes. Un immense écrivain. Un écrivain



dont l'influence ne cesse de croître. L'égal des plus grands. Un écrivain dont le talent se confirme livre après livre. Un écrivain traduit dans plus de trente langues. Un auteur culte. Un lauréat de nombreux prix...

Ces superlatifs, qui font le charme monotone des quatrième de couverture, vantent en fait l'un ou l'autre des innombrables auteurs d'envergure honorable, sans plus. Les génies patentés – Dante, Cervantès, Goethe, Hugo, etc. – n'ont pas besoin, pour se vendre, que les quatrième de couverture s'extasient. Et il y a des gens que cela ne dissuade pas d'écrire ! Ils postulent à leur tour... la palme de l'intrépidité revenant à l'Anglais Shakespeare (entendez : Nicholas Shakespeare, romancier né en 1957).

LA THÉORIE DU « TOUT »

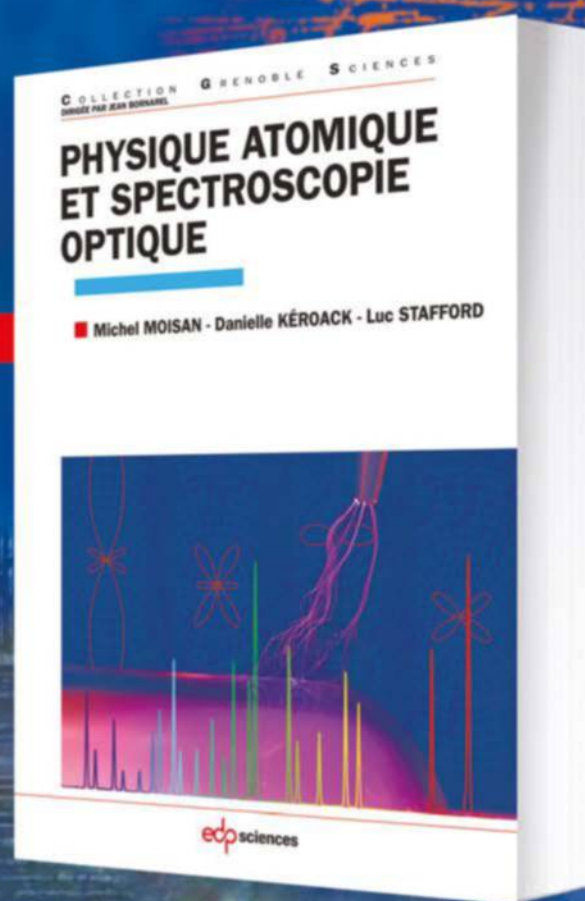
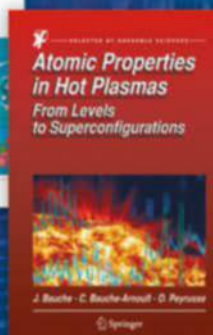
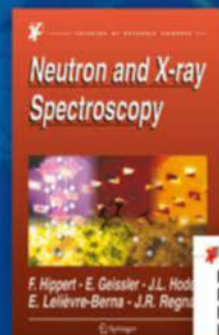
Lorsque je dis : « Tout bien examiné, j'ai tout à gagner à agir ainsi », je n'ai pas examiné tout. L'avenir peut faire surgir une éventualité imprévue. En fait, le pronom « tout » ne désigne à peu près jamais tout ! Je n'aimerais pas que les amis à qui j'ai annoncé que je mange de tout concoquent pour le dîner un velouté d'amanites phalloïdes. Dans le dicton « Tout vient à point à qui sait attendre », on ne peut pas remplacer « tout » par caillou, hibou, chou ou genou !

Un des rares cas où « tout » a son sens littéral est la formule panthéiste « Dieu est en tout » : Dieu est dans tous les grains de sable, tous les brins d'herbe, toutes les pensées, etc. Sinon, quand on dit « tout », on a en tête (de façon floue, et parfois erronée) un ensemble de possibilités auxquelles ce « tout » est astreint. Il a un contexte dont il ne peut pas sortir. Le pronom « tout » semble universel et absolu. En fait, il est vague et relatif.



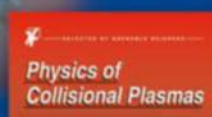
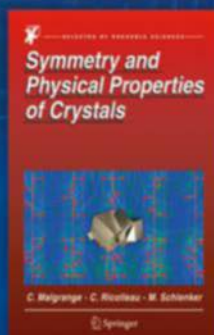
GRENOBLE SCIENCES

■ SPECTROSCOPIES



NOUVEAUTÉ

■ ... et les corrélats



www.grenoble-sciences.fr

■ GRENOBLE SCIENCES



POUR COMMANDER : les ouvrages en français sont en vente dans le rayon Sciences des librairies ou sur Internet : laboutique.edpsciences.fr

Grenoble Sciences, Université Grenoble Alpes, Bât. B de Phitem,
230 rue de la Physique – CS 40700 38058 Grenoble cedex 9

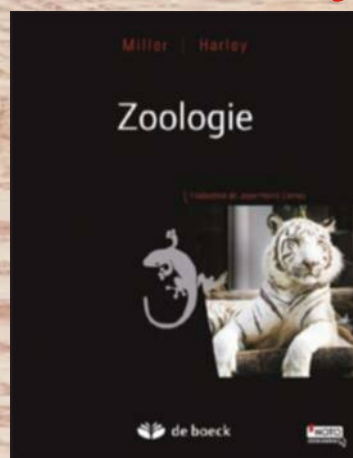
Tél. (33)4 76 51 46 95

Email : Grenoble.Sciences@ujf-grenoble.fr

AUVERGNE – Rhône-Alpes



Réjouissez-vous, c'est bientôt la rentrée !



J. P. HARLEY, S. A. MILLER
Traduction : J.-P. CORNEC
9782804188160 • 640 p. • 72,00 €
Éd. 2015



À
paraître en
octobre

L. SHERWOOD, H. KLANDORF, P. YANCEY
Traduction : J.-P. CORNEC
9782807302860 • 896 p. • 79,90 €
Oct. 2016



**P. H. RAVEN, G. B. JOHNSON, J. B. LOSOS,
K. A. MASON, S. R. SINGER**
*Traduction : J. BOUHARMONT, P. L. MASSON,
C. VAN HOVE*
9782804184582 • 1400 p. • 75,00 €
2^e éd. 2014



N. E. SCHORE, K. P. C. VOLLHARDT
Traduction : P. DEPOVERE
9782804190446 • 1400 p. • 99,50 €
6^e éd. 2015



E. HECHT
Traduction : T. BECHERRAWY
9782744500183 • 1328 p. • 89,00 €
Éd. 1999

Des livres pour aimer les sciences

deboeck
SUPÉRIEUR **B**